

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR-LEGANÉS



TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ANTENAS DE PARCHE CON DIAGRAMA DE  
RADIACIÓN MONOPOLAR Y BANDA ANCHA**

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN

AUTOR: Pablo Vera Sesmero

TUTOR: Francisco Javier Herraiz Martínez

19 de Junio de 2014

# Agradecimientos

Esta parte está dedicada a todos los que han intervenido de alguna forma en la realización de este trabajo que supone el fin de mi educación universitaria.

En primer lugar me gustaría agradecer a mi tutor el Doctor Francisco Javier Herraiz Martínez por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de fin de grado bajo su supervisión, con una inestimable ayuda y buenas sugerencias que me han ayudado a terminar el trabajo.

También me tengo que acordar de todos mis compañeros durante mis estudios, muchos de los cuales puedo considerar amigos: Javi, Ainhoa, Aarón, David... hemos pasado muy buenos momentos, que nos han ayudado bastante a afrontar la estresante vida del estudiante de ingeniería.

No me puedo olvidar de toda mi familia, gracias a mis abuelos, tíos y primos por todos los buenos momentos y las cosas que hemos vivido juntos. Muchísimas gracias a mi hermano Héctor, por aguantarme muchas veces en las que puedo ser un poco insoportable. Por último, mis padres; Inma y Jose, me cuesta escribir mi agradecimiento a todo lo que me habéis dado. Gracias por apoyarme siempre, por estar siempre a mi lado, por la educación que me habéis dado y por vuestro apoyo durante todos mis estudios; es muy probable que sin vosotros no hubiese realizado mis estudios universitarios.

# Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se presentan varias antenas de parche con diagrama de radiación monopolar; algunas de ellas tienen la capacidad de funcionar en más de una frecuencia y otras ofrecen ancho de banda elevado.

La primera antena es un parche circular cortocircuitado que funciona a dos frecuencias ajustables, en la primera de ellas con diagrama de radiación monopolar y en la segunda con diagrama de radiación broadside. La segunda antena es una modificación del primer diseño para conseguir aumentar el ancho de banda de funcionamiento.

La tercera antena consiste en dos parches circulares apilados cortocircuitados, estando alimentado directamente el parche inferior. Se consiguen cuatro frecuencias de resonancia, dos debidas a cada parche. Se han estudiado los efectos de las dimensiones de la antena sobre las frecuencias de funcionamiento. Se proponen dos prototipos, el primero de ellos tiene tres frecuencias de funcionamiento, dos monopulares y una broadside de banda ancha; el segundo tiene cuatro frecuencias de funcionamiento, dos monopulares y dos broadside.

La cuarta antena es un parche cuadrado y la quinta es un anillo cuadrado, ambas con paredes de cortocircuito en dos de sus lados. Se consigue una frecuencia de funcionamiento de banda ancha con diagrama de radiación monopolar. Se han estudiado los efectos de las dimensiones de la antena sobre el ancho de banda. Se ha propuesto un prototipo de ambas antenas para cubrir una banda de interés. Ambas antenas cumplen las especificaciones para la radionavegación aérea. Además, se ha realizado un prototipo para radionavegación aérea.

# Abstract

In this Bachelor Final Project several patch antennas with monopolar radiation pattern are proposed; some of them have the capability to work in more than one frequency and others have broadband operation.

The first antenna is a circular shorted patch which operates at two adjustable frequencies. At the first operation frequency a monopolar radiation pattern is obtained. At the second one a broadside radiation pattern is obtained. The second antenna is a modification of the first design to get increased bandwidth operation.

The third antenna consists of two circular stacked shorted patches, being directly feed the lower patch. Four resonance frequencies are obtained, two due to each patch. The effects of the dimensions of the antenna on the operating frequencies are studied. Two prototypes are proposed: the first prototype has three operating frequencies (two monopolar and one broadside broadband) and the second prototype has four operating frequencies (two monopolar and two broadside).

The fourth antenna is a square patch and the fifth antenna is a square ring, both with shorting walls in two of their sides. A patch antenna with monopolar radiation pattern and broadband operation is achieved. The effects of the dimensions of the antenna on the bandwidth are studied. A prototype of both antennas to cover a band of interest is proposed. Both antennas meet specificactions for aerial radionavigation. A prototype for radionavigation application is designed.

# Índice general

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos y motivación .....	1
1.2 Introducción a las antenas de parche .....	3
1.3 Ventajas y desventajas.....	5
1.4 Geometrías básicas de las antenas de parche .....	6
1.5 Modos en las antenas de parche .....	7
1.6 Alimentación en las antenas de parche .....	9
1.7 Estado del arte .....	12
2. Estrategias básicas para diseñar parches con diagrama de radiación monopolar ....	19
2.1 Parche circular cortocircuitado en el centro .....	19
2.1.1 Estructura y dimensiones de la antena .....	19
2.1.2 Adaptación y diagrama de radiación de la antena .....	20
2.1.3 Alimentación diferencial .....	24
2.2 Parche circular cortocircuitado con alimentación por acoplo en L .....	28
2.2.1 Estructura y dimensiones de la antena .....	28
2.2.2 Adaptación y diagrama de radiación de la antena .....	29
2.3 Parche circular cortocircuitado con parche apilado .....	32
2.3.1 Estructura y dimensiones de la antena .....	32
2.3.2 Análisis de las frecuencias de funcionamiento y diagrama de radiación para el modo TM <sub>01</sub> .....	33
2.3.3 Análisis de las frecuencias de funcionamiento y de diagrama radiación para el modo TM <sub>11</sub> .....	37
2.3.4 Prototipo de antena de tres frecuencias: dos monopulares y una broadside de banda ancha .....	40
2.3.5 Prototipo de antena de cuatro frecuencias: dos monopulares y dos broadside .....	46
3. Diseño de antenas de parche con diagrama de radiación monopolar y banda ancha .....	53
3.1 Parche cuadrado con paredes de cortocircuito.....	53
3.1.1 Estructura, dimensiones de la antena y funcionamiento .....	53

3.1.2 Estudio paramétrico .....	56
3.1.3 Prototipo para la banda de radionavegación aérea .....	61
3.2 Parche de anillo cuadrado con paredes de cortocircuito .....	69
3.2.1 Estructura, dimensiones de la antena y funcionamiento .....	69
3.2.2 Estudio paramétrico .....	72
3.2.3 Prototipo para la banda de radionavegación aérea .....	77
4. Conclusiones y líneas futuras .....	87
4.1 Conclusiones .....	87
4.2 Líneas futuras de investigación.....	89
4.2.1 Polarización circular .....	89
4.2.2 Incremento del ancho de banda .....	90
Anexo I. Planos del prototipo de antena para radionavegación aérea.....	91
Anexo II. Presupuesto.....	94
Anexo III. Planificación.....	96
Anexo IV. Características de productos comerciales .....	97
Bibliografía.....	100

# Índice de figuras

Figura 1.1. Estructura básica de una antena de parche [1].....	3
Figura 1.2. Distribución de campo eléctrico en dirección z y corrientes magnéticas en los bordes radiantes del parche. ....	4
Figura 1.3. Diagrama de radiación de un parche rectangular en su modo fundamental. ....	5
Figura 1.4. Geometrías básicas de las antenas de parche [2]. ....	6
Figura 1.5. Distribución de campo eléctrico en dirección z y diagrama de radiación del modo TM <sub>02</sub> en un parche rectangular.....	7
Figura 1.6. Diagrama de radiación de una antena de parche circular en el modo fundamental TM <sub>11</sub> .....	8
Figura 1.7. Campo eléctrico en dirección z y diagrama de radiación de una antena de parche circular en el modo TM <sub>21</sub> . ....	9
Figura 1.8. Distribución de campo eléctrico en dirección z y diagrama de radiación de una antena de parche circular en el modo TM <sub>01</sub> . ....	9
Figura 1.9. Alimentación por coaxial de un parche rectangular [2]. ....	10
Figura 1.10. Alimentación por línea acoplada o L. ....	10
Figura 1.11. Alimentaciones por línea microstrip. (a) Línea introducida en el parche. (b) Gap entre línea microstrip y parche [2]. ....	11
Figura 1.12. Alimentación por línea microstrip acoplada por apertura [2]. ....	11
Figura 1.13. Alimentación de un anillo cuadrado mediante un parche cuadrado acoplado. ....	12
Figura 1.14. Efectos del sustrato sobre la eficiencia y el ancho de banda de las antenas de parche [2].....	13
Figura 1.15. Estructura de la antena [9]. (a) Esquema de la antena. (b) Antena fabricada. ....	14
Figura 1.16. Esquema de la estructura de la antena propuesta en [18]. ....	16
Figura 1.17. Estructura de la antena propuesta en [26].....	18
Figura 2.1.1. Esquema de la estructura de la antena 2.1. (a) Vista de perfil. (b) Vista de planta [15]. ....	19
Figura 2.1.2. Modelo en tres dimensiones de la antena 2.1 ..... ..	20
Figura 2.1.3. Gráfica de adaptación de la antena 2.1..... ..	20
Figura 2.1.4. Campo eléctrico en dirección z del modo TM <sub>01</sub> ..... ..	21
Figura 2.1.5. Diagrama de radiación del modo TM <sub>01</sub> ..... ..	21
Figura 2.1.6. Diagrama de radiación del modo TM <sub>01</sub> en el plano XZ. ....	22
Figura 2.1.7. Diagrama de radiación del modo TM <sub>01</sub> en el plano XY. ....	22
Figura 2.1.8. Campo eléctrico en dirección z del modo TM <sub>11</sub> ..... ..	23
Figura 2.1.9. Diagrama de radiación del modo TM <sub>11</sub> ..... ..	23
Figura 2.1.10. Diagrama de radiación del modo TM <sub>11</sub> en el plano XZ. ....	24

Figura 2.1.11. Modelo en tres dimensiones de la antena con alimentación diferencial.	24
Figura 2.1.12. Parámetros $ S_{11} $ para diferentes valores del punto de alimentación diferencial.	25
Figura 2.1.13. Parámetros $ S_{21} $ para diferentes valores del punto de alimentación diferencial.	25
Figura 2.1.14. Pérdidas de retorno a la entrada del divisor Wilkinson.	26
Figura 2.1.15. Diagrama de radiación del modo TM01 con alimentación dual.	27
Figura 2.1.16. Diagrama de radiación del modo TM01 en el plano XY con alimentación diferencial.	27
Figura 2.1.17. Diagrama de radiación del modo TM01 en el plano XZ con alimentación diferencial.	28
Figura 2.2.1. Modelo en tres dimensiones de la antena 2.2.	28
Figura 2.2.2. Modelo detallado en tres dimensiones de la alimentación.	29
Figura 2.2.3. Gráfica de adaptación de la antena 2.2.	30
Figura 2.2.4. Diagrama de radiación del modo TM01.	30
Figura 2.2.5. Diagrama de radiación del modo TM01 en el plano XY.	31
Figura 2.2.6. Diagrama de radiación del modo TM11.	31
Figura 2.2.7. Diagrama de radiación del modo TM11 en el plano XZ.	32
Figura 2.3.1. Esquema de la estructura de la antena 2.3. (a) Vista de perfil. (b) Vista de planta.	33
Figura 2.3.2. Modelo en tres dimensiones de la antena 2.3.	33
Figura 2.3.3. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro $a_2$ (modo TM01).	34
Figura 2.3.4. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro $h_2$ (modo TM01).	35
Figura 2.3.5. Adaptación de la antena para diferentes valores del punto de alimentación (modo TM01).	36
Figura 2.3.6. Estructura en tres dimensiones de la antena con dieléctrico.	36
Figura 2.3.7. Adaptación de la antena para diferentes valores de permitividad relativa.	37
Figura 2.3.8. Adaptación de la antena para diferentes valores del punto de alimentación (modo TM11).	38
Figura 2.3.9. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro $a_2$ (modo TM11).	39
Figura 2.3.10. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro $h_2$ (modo TM11).	39
Figura 2.3.11. Coeficiente de reflexión de la antena 2.3.4.	41
Figura 2.3.12. Diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM01.	42
Figura 2.3.13. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM01.	42



Figura 2.3.14. Diagrama de radiación en el plano XY de la frecuencia inferior del modo TM01.....	42
Figura 2.3.15. Diagrama de radiación de la frecuencia superior del modo TM01.....	43
Figura 2.3.16. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia superior del modo TM01.....	43
Figura 2.3.17. Campo eléctrico en dirección z de la frecuencia superior del modo TM01. ....	44
Figura 2.3.18. Diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM11. ....	44
Figura 2.3.19. Diagrama de radiación de la frecuencia superior del modo TM11.....	45
Figura 2.3.20. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM11.....	45
Figura 2.3.21. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia superior del modo TM11.....	45
Figura 2.3.22. Coeficiente de reflexión de la antena 2.3.5. ....	47
Figura 2.3.23. Diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM01. ....	48
Figura 2.3.24. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM01.....	48
Figura 2.3.25. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM01.....	48
Figura 2.3.26. Diagrama de radiación de la frecuencia superior del modo TM01.....	49
Figura 2.3.27. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia superior del modo TM01.....	49
Figura 2.3.28. Campo eléctrico en dirección z de la frecuencia superior del modo TM01. ....	50
Figura 2.3.29. Diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM11. ....	50
Figura 2.3.30. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM11.....	51
Figura 2.3.31. Diagrama de radiación de la frecuencia superior del modo TM11.....	51
Figura 2.3.32. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia superior del modo TM11.....	52
Figura 3.1.1. Esquema de la estructura de la antena 3.1. Vista de perfil y de planta....	53
Figura 3.1.2. Campo eléctrico en dirección z de la antena 3.1. ....	54
Figura 3.1.3. Diagrama de radiación de la antena 3.1.....	55
Figura 3.1.4. Diagrama de radiación en el plano ZY de la antena 3.1. ....	55
Figura 3.1.5. Diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1. ....	55
Figura 3.1.6 Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro a. ....	56
Figura 3.1.7. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro h. ....	57
Figura 3.1.8. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro r.....	57
Figura 3.1.9. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro w. ....	58
Figura 3.1.10. Diferentes gráficas de adaptación correspondientes a diferentes valores del parámetro g. ....	59

Figura 3.1.11. Adaptación de la antena para diferentes valores (pequeños) del lado del plano de masa.....	59
Figura 3.1.12. Adaptación de la antena para diferentes valores (grandes) del lado del plano de masa.....	60
Figura 3.1.13. Modelo en tres dimensiones de la antena 3.1.3. ....	61
Figura 3.1.14. Parámetro $ S_{11} $ de la antena 3.1.3. ....	62
Figura 3.1.15. ROE de la antena 3.1.3 (en rojo) y ROE máxima en cada frecuencia (en azul). ....	62
Figura 3.1.16. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 960 MHz. ....	63
Figura 3.1.17. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 1025 MHz. ....	64
Figura 3.1.18. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 1090 MHz. ....	65
Figura 3.1.19. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 1155 MHz. ....	66
Figura 3.1.20. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 1220 MHz. ....	67
Figura 3.1.21. Ganancia máxima y diferencia de ganancia en el plano XY en la banda de funcionamiento. ....	68
Figura 3.2.1. Esquema de la estructura de la antena 3.2. Vista de perfil y de planta....	69
Figura 3.2.2. Campo eléctrico en dirección z de la antena 3.2. ....	70
Figura 3.2.3. Diagrama de radiación de la antena 3.1.....	71
Figura 3.2.4. Diagrama de radiación en el plano XZ de la antena 3.2. ....	71
Figura 3.2.5. Diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2. ....	71
Figura 3.2.6. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro a. ....	72
Figura 3.2.7. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro b. ....	73
Figura 3.2.8. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro c.....	73
Figura 3.2.9 Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro h. ....	74
Figura 3.2.10. Diferentes gráficas de adaptación correspondientes a diferentes valores del parámetro w. ....	75
Figura 3.2.11. Adaptación de la antena para diferentes valores (pequeños) del lado del plano de masa.....	76
Figura 3.2.12. Adaptación de la antena para diferentes valores (grandes) del lado del plano de masa.....	76
Figura 3.2.13. Modelo en tres dimensiones de la antena 3.2.3. ....	78
Figura 3.2.14. Parámetro $ S_{11} $ de la antena 3.2.3. ....	78
Figura 3.2.15. ROE de la antena 2.5.3 (en rojo) y ROE máxima en cada frecuencia (en azul). ....	79
Figura 3.2.16. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 960 MHz. ....	80

Figura 3.2.17. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 1025 MHz. ....	81
Figura 3.2.18. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 1090 MHz. ....	82
Figura 3.2.19. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 1155 MHz. ....	83
Figura 3.2.20. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 1220 MHz. ....	84
Figura 3.2.21. Ganancia máxima y diferencia de ganancia en el plano XY en la banda de funcionamiento. ....	85

# 1. Introducción

En este capítulo se presentarán conceptos básicos de las antenas de parche, así como ciertas características particulares que permitan entender el trabajo realizado. También se va a explicar el estado del arte de las antenas que se van a estudiar y los objetivos del trabajo de fin de grado.

## 1.1 Objetivos y motivación

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es el de estudiar y desarrollar antenas de parche con diagrama de radiación monopolar y banda ancha; por lo general, las antenas de parche tienen un diagrama de radiación de tipo broadside (máximo de radiación en la dirección ortogonal al plano de masa y poco directivo en comparación a los diagramas de radiación de tipo pincel, se explicará en la sección 1.2) que hace muy difícil su aplicación a sistemas de radionavegación aérea ya que la potencia radiada se reparte de forma muy desigual por todas las direcciones del espacio y es necesario que la antena esté orientada. Si se consigue un diagrama de radiación monopolar, la antena no tiene que estar orientada de forma ajustada para poder emitir o recibir energía, ya que la energía radiada se reparte de forma bastante uniforme por todas las direcciones del espacio; esto es bastante novedoso en las antenas de parche, que tradicionalmente se han utilizado con diagrama de radiación de tipo broadside. Además, se cuenta con la ventaja del bajo perfil que tienen las antenas de parche que permite una fácil integración sobre superficies sin sobresalir de la estructura.

Debido a los requisitos de los sistemas de navegación actuales, se pretende conseguir un ancho de banda elevado para cumplir los requisitos de la banda objetivo; se pretende cubrir la banda que va desde 960 MHz a 1220 MHz, que está reservada a sistemas de radionavegación aérea. Los requisitos de ROE son:

$$1030 \text{ MHz} < f < 1090 \text{ MHz} \quad ROE < 1.5$$

$$960 \text{ MHz} < f < 1030 \text{ MHz} \text{ y } 1090 \text{ MHz} < f < 1220 \text{ MHz} \quad ROE < 1.7$$

Los sistemas en los que se podría aplicar esta antena son varios, entre los que se encuentran:

DME, cuyas siglas provienen del inglés *Distance Measuring Equipment*, que utiliza una frecuencia que va desde 962 MHz hasta 1213 MHz. El funcionamiento básico del sistema es que el equipo instalado en el avión envía una secuencia de pares de pulsos que recibe el equipo de tierra; cuando han pasado 50  $\mu\text{s}$ , el equipo de tierra

retransmite esta señal y el equipo del avión la recibe. En el equipo del avión, se calcula la diferencia de tiempo desde que emitió la señal hasta que la recibió de nuevo, le resta  $50\text{ }\mu\text{s}$  y lo multiplica por la velocidad de la luz, que es la velocidad de propagación de la onda en el aire, y después lo divide por dos ya que la señal ha recorrido dos veces la distancia entre el equipo del avión y el equipo de tierra. Con este proceso se halla la distancia en línea recta desde el avión hasta el equipo de tierra; para calcular la distancia desde la proyección del avión sobre el suelo hasta el equipo de tierra solo es necesario conocer la altura de vuelo y aplicar el teorema de Pitágoras. Como a priori no se conoce la posición del equipo de tierra, es muy útil disponer de un diagrama de radiación monopolar. La empresa Cobham produce antenas para este sistema, fundamentalmente con forma de monopolo o de aleta de tiburón, lo que hace difícil su integración ya que sobresalen de la estructura sobre la que van integradas; en el Anexo IV se encuentran las hojas de características de dos productos de esta empresa.

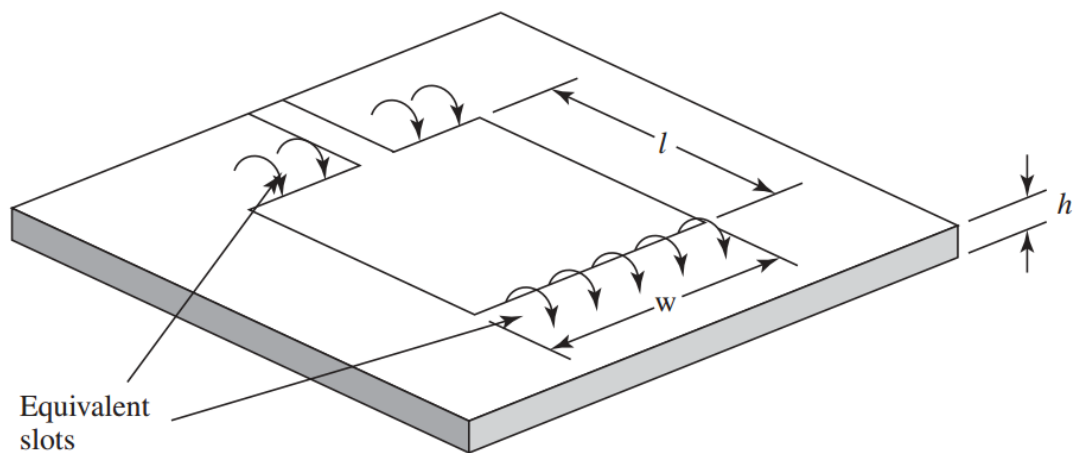
En el sistema TACAN (acrónimo en inglés de *tactical air navigation system*) se utiliza tanto la distancia hacia el equipo de tierra según las especificaciones de DME como la dirección hacia el equipo de tierra; la dirección se consigue rotando físicamente la antena sobre un eje vertical. Lógicamente, cuando la antena del avión está orientada de forma que su punto de máxima directividad apunta al equipo de tierra la potencia recibida se va a maximizar, de forma que se puede conocer la dirección a la que se encuentra el equipo de tierra. Evidentemente, se necesita una antena cuya directividad no sea constante en todo  $\phi$  para tener una dirección de máxima directividad. Este tipo de antenas las venden empresas como Rantec Antennas y dB Systems Inc., aunque no venden la antena por separado si no que venden el equipo entero, que por lo general es bastante grande al incluir partes móviles para rotar la antena. En el Anexo IV se encuentran las características de un producto de dB Systems Inc..

El sistema IFF se utiliza en aviación para conocer detalles sobre otros aviones situados cerca. Utiliza dos frecuencias, una a 1030 MHz para pedir detalles a otras aeronaves y otra a 1090 MHz para responder a las peticiones recibidas. Tiene varios modos de operación, unos para uso civil y otros reservados a uso militar. En aplicaciones militares se utiliza fundamentalmente para saber si los aviones detectados son amigos o enemigos, ya que cuando un avión detecta otro, envía una señal de petición de detalles al otro avión; si es un avión amigo, envía un código previamente acordado. De esta forma, se puede realizar la identificación de aviones de forma muy rápida ya que visualmente no es posible.

## 1.2 Introducción a las antenas de parche

Las antenas de parche, también conocidas como antenas microstrip, son un tipo de antenas propuesto en la década de 1950. Tuvieron que pasar 20 años hasta la década de 1970 que es cuando se empezaron a utilizar, ya que hubo mejoras tecnológicas en cuanto a métodos de fabricación, disponibilidad de nuevos materiales para ser utilizados como sustrato (con tangente de pérdidas reducida) y mejores modelos teóricos que permiten un análisis más fiel a la realidad y por tanto unas bases fiables para el diseño de las antenas.

Como su nombre indica, provienen directamente de la tecnología de líneas de transmisión microstrip. Una antena de parche en su forma más simple consiste en un plano de masa, una placa metálica de espesor muy pequeño que es el parche y está situado a una altura  $h$  del plano de masa, y entre medias un dieléctrico (que puede ser aire); la alimentación puede ser de muchas formas, pero la más simple consiste en una línea microstrip pegada directamente al parche (la anchura de esta línea debe ser considerablemente menor que la anchura del parche). Un ejemplo de esta antena puede ser visto en la Figura 1.1; se muestran las dimensiones fundamentales del parche y las ranuras de radiación.



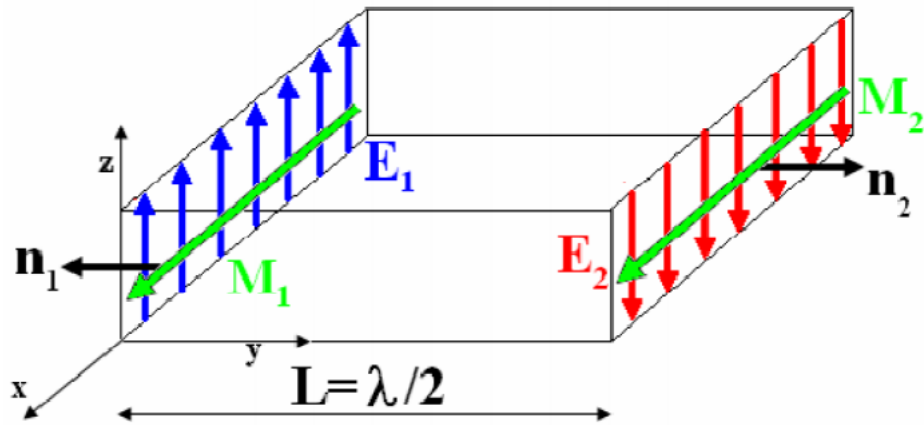
**Figura 1.1. Estructura básica de una antena de parche [1].**

Para el modo fundamental, la forma más simple (y a la vez muy básica) de entender como radia una antena de parche rectangular consiste en entender la antena como un resonador  $\lambda/2$  alimentado por la dirección  $y$  (en relación al sistema de coordenadas de la Figura 1.2); la longitud  $L$  de la antena es  $\lambda_g/2$  (por existir un dieléctrico con  $\epsilon_r$  diferente de 1, la longitud de onda disminuye). El campo eléctrico del modo fundamental en el interior del parche es:

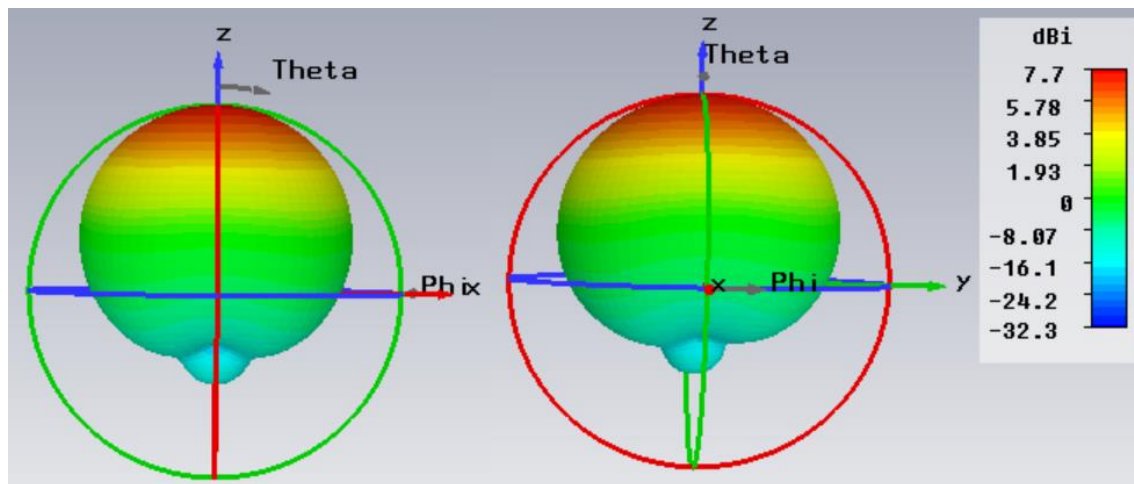
$$\vec{E}_z = E_0 \cos\left(\frac{\pi y}{L}\right) \hat{z}$$

De donde se obtiene que el campo eléctrico en los bordes radiantes del parche sea de igual amplitud y en contrafase.

Partiendo de aquí, de la ecuación  $\vec{M} = -2 \hat{n} \times \vec{E}$  se puede asumir por el principio de equivalencia que en cada borde radiante se crea una corriente magnética, resultando que las corrientes magnéticas de ambos bordes radiantes son iguales en módulo y fase, como se indica en la Figura 1.2. Al tener dos corrientes magnéticas iguales separadas  $\lambda_g/2$ , se puede entender la antena como un array de dos ranuras separadas  $L$  que radian de la misma forma, lo que provoca el típico diagrama de radiación de tipo broadside (máximo en  $\theta = 0^\circ$ ), como se puede apreciar en la Figura 1.3. Los otros dos slots no aportan significativamente a la radiación.



**Figura 1.2. Distribución de campo eléctrico en dirección z y corrientes magnéticas en los bordes radiantes del parche.**



**Figura 1.3. Diagrama de radiación de un parche rectangular en su modo fundamental.**

### 1.3 Ventajas y desventajas

Las principales ventajas de las antenas de parche son las siguientes:

- Tamaño bastante reducido, lo cual permite que se puedan integrar en gran cantidad de dispositivos en los cuales otros tipos de antenas están limitados por el espacio; esto es importante sobre todo para antenas de comunicaciones móviles, donde se dispone de poco espacio para colocar las antenas. También es destacable su bajo perfil, ya que permite que sean integradas en superficies planas sin, por ejemplo, empeorar la aerodinámica de un vehículo tanto como otras antenas que sobresalgan de la estructura; esto es interesante a la hora de integrar una antena en el ala de un avión o de integrar una antena de, por ejemplo, GPS en el techo de un coche.
- Tienen un peso muy reducido.
- Facilidad para ser integradas en circuitos de microondas; también pueden ser impresas a la vez que por ejemplo un filtro o una red de adaptación.
- Al ser una antena muy simple, es barata, fácil y rápida de fabricar, lo que permite producirlas en masa y conseguir bajos precios.
- Al poder ser grabadas industrialmente, es muy fácil construir arrays.
- Al poder excitarse diferentes modos a la vez variando la forma de la antena, se consigue que cada modo funcione a una frecuencia determinada (que a su vez es ajustable), lo que permite a la antena funcionar a más de una frecuencia.
- En el modo fundamental la eficiencia de radiación es muy alta (superior al 90-95%). En los modos superiores también se consiguen eficiencias de radiación altas, a no ser que se coloque un dieléctrico de altura considerable y tangente de pérdidas altas.



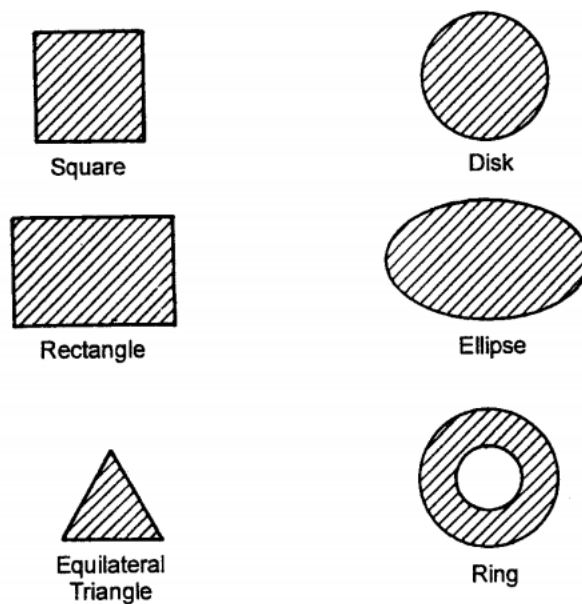
- Posibilidad de conseguir polarización lineal y circular con alimentaciones relativamente simples.

Las principales desventajas de las antenas de parche son las siguientes:

- Al ser antenas resonantes, tienen un ancho de banda muy reducido si se utilizan alimentaciones simples, de alrededor del 2-3%.
- Pueden manejar poca potencia debido a la poca distancia existente entre el parche y el plano de masa y al uso de dieléctricos.
- Muchas pérdidas óhmicas en las estructuras de alimentación de los arrays.
- Aparición de ondas de superficie que pueden empeorar la radiación.
- Aparecen modos superiores, que son armónicos del fundamental; por lo general son no deseados, ya que aparecen sin ser necesarios y presentan diagramas de radiación multilobulados de poco interés.

## 1.4 Geometrías básicas de las antenas de parche

Con el paso de los años, se han estudiado gran cantidad de geometrías diferentes para diseñar antenas de parche. Las diferentes geometrías tienen características diferentes que las hacen interesantes para determinadas aplicaciones; no obstante, la mayoría de antenas se realizan con geometría rectangular o circular porque el diseño es más fácil (han sido los modelos más estudiados hasta ahora) y la fabricación es sencilla. En la Figura 1.4 se pueden observar varias geometrías de parches.



**Figura 1.4. Geometrías básicas de las antenas de parche [2].**

En el presente trabajo de fin de grado, nos vamos a centrar en antenas con parche circular, aunque también se van a contemplar antenas rectangulares y de anillo cuadrado.

## 1.5 Modos en las antenas de parche

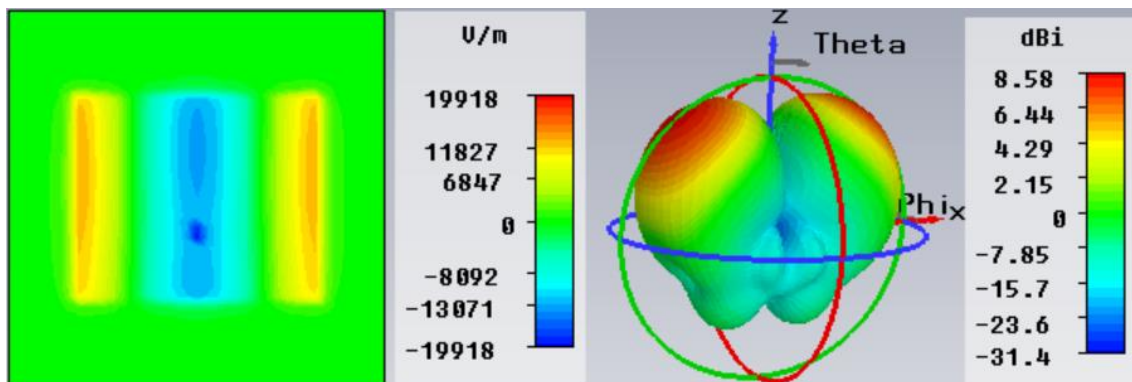
El modo fundamental de las antenas de parche rectangulares situadas sobre el plano XY (según el sistema de coordenadas de la figura 1.2) es el modo TM<sub>10</sub>, del cual ya hemos explicado su distribución de campo eléctrico y su diagrama de radiación en las Figuras 1.2 y 1.3.

En el caso del parche rectangular, es inevitable que al comportarse como un resonador aparezcan modos superiores a frecuencias superiores, como se puede observar en la siguiente ecuación que indica las frecuencias a las que aparecen los modos:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

Donde  $m$  y  $n$  son los índices de los modos y  $a$  y  $b$  las dimensiones del parche.

Los modos superiores que aparecen provocan diagramas de radiación que no tienen interés práctico para este trabajo de fin de grado ya que tienen varios lóbulos. En la Figura 1.5 se puede observar el campo eléctrico en dirección  $z$  y el diagrama de radiación del modo superior TM<sub>02</sub>.

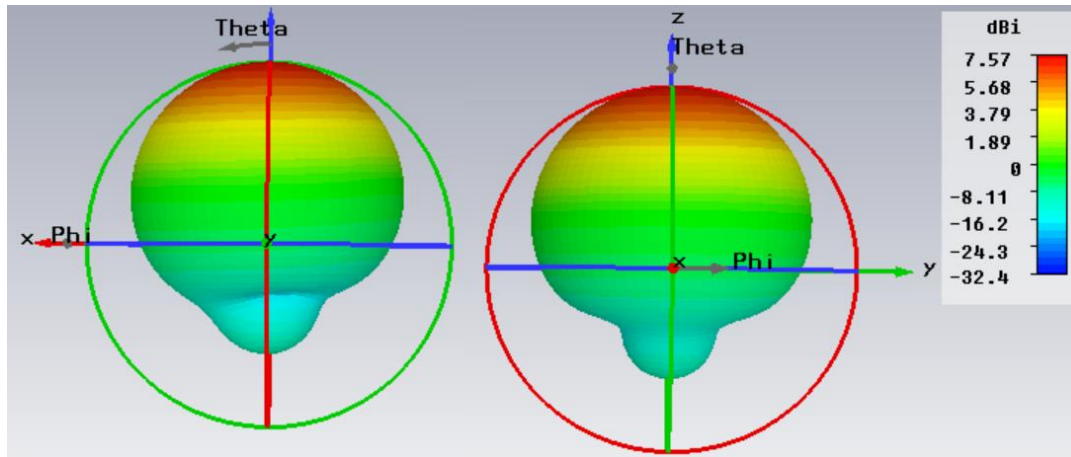


**Figura 1.5. Distribución de campo eléctrico en dirección  $z$  y diagrama de radiación del modo TM<sub>02</sub> en un parche rectangular.**

La estructura del parche rectangular se puede modificar para crear un campo eléctrico que provoca un diagrama de radiación interesante (parecida al monopolar) para los

objetivos de este trabajo de fin de grado, y que será estudiado en las antenas del Capítulo 3.

En las antenas circulares, el modo fundamental es el modo TM<sub>11</sub> y radia de una forma muy parecida al modo fundamental del parche cuadrado. En la Figura 1.6 se puede ver el diagrama de radiación de un parche circular en su modo fundamental.



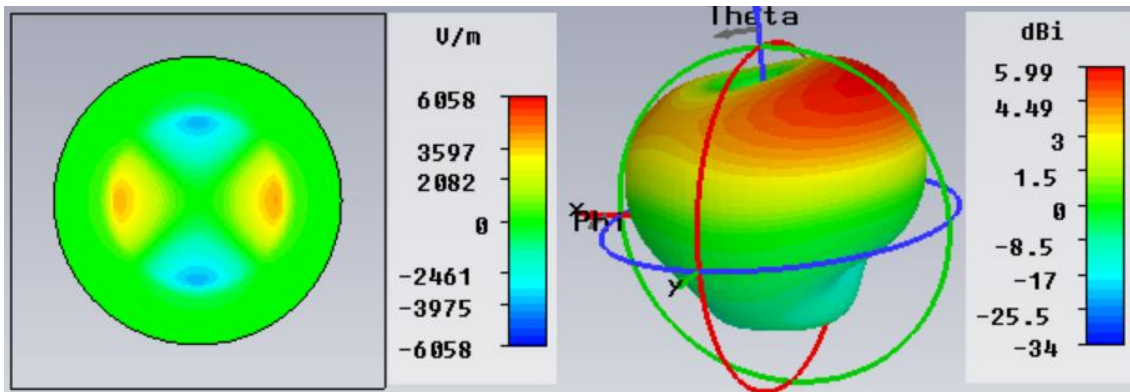
**Figura 1.6. Diagrama de radiación de una antena de parche circular en el modo fundamental TM<sub>11</sub>.**

En el caso del parche circular también aparecen modos superiores, como se puede deducir de la siguiente ecuación:

$$f = \frac{P_{mn}}{2\pi r \sqrt{\mu\epsilon}}$$

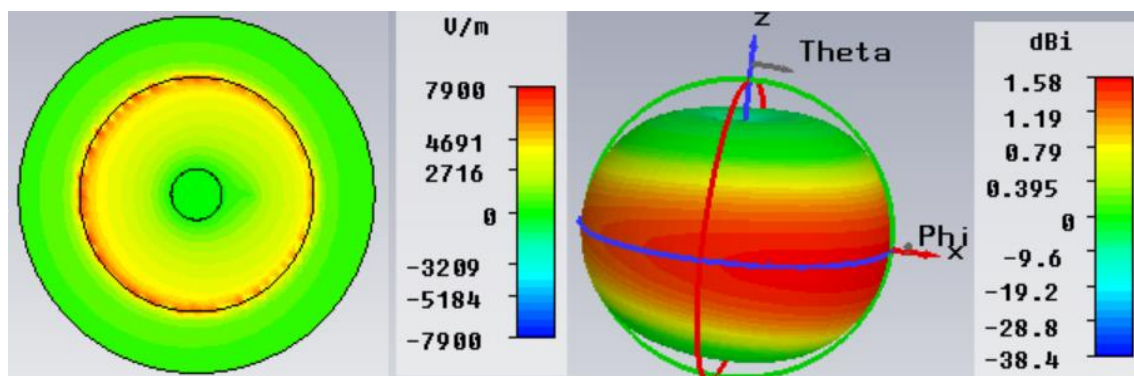
$P_{mn}$  hace referencia a la raíz del polinomio de Bessel de cada modo ( $m$  y  $n$  son los índices del modo) y  $r$  al radio del parche.

Los modos superiores tienen un interés limitado para este proyecto, puesto que aunque algunos modos tienen un diagrama de radiación con similitudes al monopolar tienen direcciones en  $\theta$  con nulos de radiación no deseados, aparte de radiar bastante más potencia en la región  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  que en la región  $90^\circ < \theta < 180^\circ$ . En la Figura 1.7 se muestra a modo de ejemplo el campo eléctrico en dirección  $z$  y el diagrama de radiación del modo superior TM<sub>21</sub>.



**Figura 1.7. Campo eléctrico en dirección z y diagrama de radiación de una antena de parche circular en el modo TM21.**

En los parches circulares también es posible crear un modo TM01 cortocircuitando el parche con el plano de masa en el centro; esto provoca que, al existir conductor, se cumpla la condición de contorno de conductor perfecto de las ecuaciones de Maxwell  $\vec{E} \times \hat{n} = 0$ , con lo cual el campo eléctrico en dirección z en los puntos cortocircuitados es 0. De esta forma provocamos que aparezca el modo TM01, que tiene un campo eléctrico que da lugar a un diagrama de radiación muy interesante, ya que es muy similar al monopolar. En la Figura 1.8 se puede observar la distribución de campo eléctrico en dirección z y su diagrama de radiación.

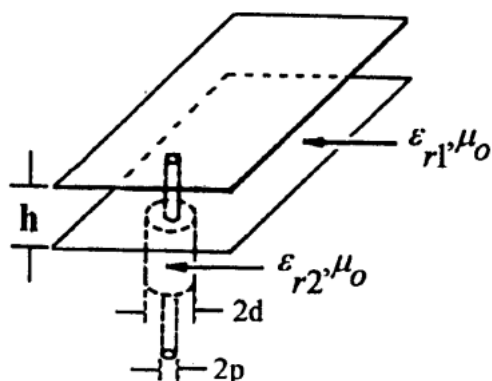


**Figura 1.8. Distribución de campo eléctrico en dirección z y diagrama de radiación de una antena de parche circular en el modo TM01.**

## 1.6 Alimentación en las antenas de parche

Se puede alimentar una antena de parche de varias formas, cada una con sus ventajas y desventajas. A continuación se comentan las más comunes:

## Alimentación por coaxial

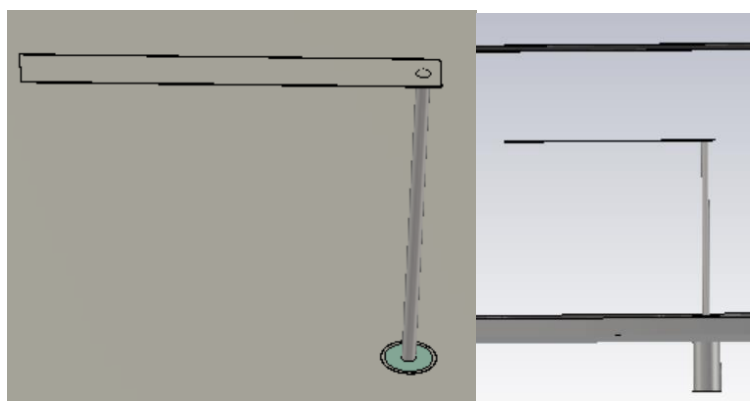


**Figura 1.9. Alimentación por coaxial de un parche rectangular [2].**

Esta es una de las alimentaciones más utilizadas, ya que es de fácil aplicación a la estructura de la antena; basta con hacer un taladro en el plano de masa y el sustrato y soldar el vivo del coaxial al parche, como se puede ver en la Figura 1.9.

Una gran ventaja de esta alimentación es la facilidad de adaptar la antena a la frecuencia deseada con únicamente variar el punto donde se coloca el coaxial.

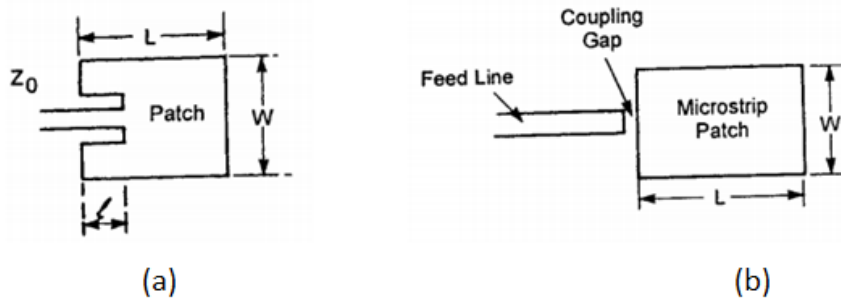
Las mayores desventajas de esta alimentación van asociadas al pobre ancho de banda conseguido ( $< 5\%$ ); esto es consecuencia de que, al necesitarse un sustrato de espesor elevado para aumentar el ancho de banda, el hilo del coaxial es grande en comparación a la longitud eléctrica, con lo cual si se hace el equivalente circuital de la alimentación se obtiene que introduce una inductancia grande. Esta desventaja puede ser solucionada en parte haciendo un cambio en la alimentación; en lugar de conectar directamente el vivo del coaxial, se conecta el vivo del coaxial a una tira metálica situada entre el plano de masa y el parche; se acopla energía de la tira metálica al parche, y al introducir la tira metálica se podría modelar como un condensador que con dimensiones apropiadas contrarresta el efecto de la inductancia del propio coaxial. La estructura se puede ver en la Figura 1.10.



**Figura 1.10. Alimentación por línea acoplada o L.**

## Alimentación por línea microstrip

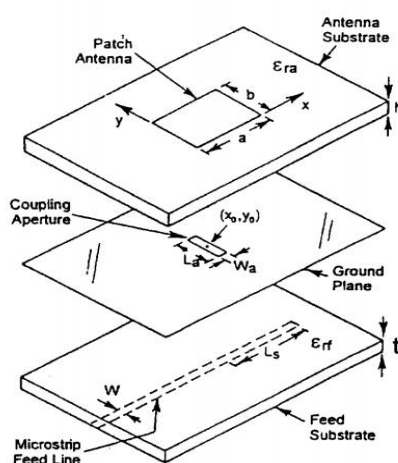
Es la alimentación más simple que existe, ya que el diseño es fácil y puede ser construida a la vez que el parche sobre el mismo sustrato. La más simple se puede observar en la Figura 1.1, aunque no suele ser una buena opción ya que la adaptación es muy mala. Se utilizan otro tipo de estructuras con cambios simples, como por ejemplo la introducción de la línea de alimentación en el parche o en lugar de unir directamente la línea con el parche dejar un gap, como se puede ver en la Figura 1.11.



**Figura 1.11. Alimentaciones por línea microstrip. (a) Línea introducida en el parche. (b) Gap entre línea microstrip y parche [2].**

Los principales inconvenientes de estas alimentaciones son el ancho de banda ( $<5\%$ ), y en el caso de la alimentación mediante gap la potencia que se puede acoplar al parche. Los diagramas de radiación tampoco son muy puros ya que los propios elementos que forman la alimentación contribuyen a la radiación total, creando radiación no deseada.

## Alimentación por línea microstrip acoplada por apertura



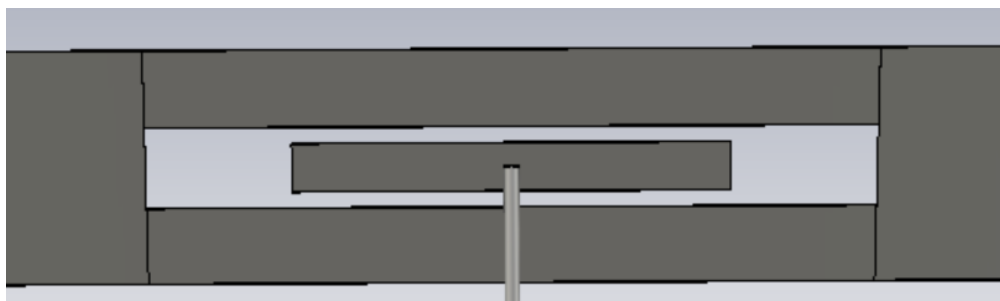
**Figura 1.12. Alimentación por línea microstrip acoplada por apertura [2].**

Esta alimentación es más compleja tanto en el diseño (tiene muchos parámetros referentes a las dimensiones que afectan fundamentalmente a la impedancia de entrada) como en la construcción, pero ofrece mejor rendimiento que las anteriores.

Se puede conseguir un ancho de banda mayor (cerca del 20%) y el diagrama de radiación no se ve prácticamente afectado por los campos y corrientes de la alimentación al hacer el plano de masa de barrera. La estructura emplea sustratos diferentes para el parche y para la línea de alimentación, aunque ambas comparten el plano de masa. El esquema de la alimentación se puede ver en la Figura 1.12.

## Alimentación por parche acoplado

El principio de funcionamiento de esta alimentación es que se alimenta directamente un parche no radiante o una línea metálica situada cerca del parche radiante, al que se transmite energía por acoplo magnético. Este tipo de alimentación presenta muchas posibilidades diferentes, tanto en el tipo de parche que se utiliza para acoplar energía como en el tipo de parche radiante; también influye la posición de ambos parches, que puede ser muy variada. Suele ser una estructura compleja de construir, aunque no mucho más que por ejemplo la alimentación por acoplo mediante apertura. Se puede llegar a conseguir un ancho de banda relativamente alto (alrededor del 30%). En la Figura 1.13 se puede observar un ejemplo de esta alimentación: el parche radiante es un anillo cuadrado, y se alimenta mediante acoplo magnético con un parche cuadrado situado en su centro que está conectado a un cable coaxial.



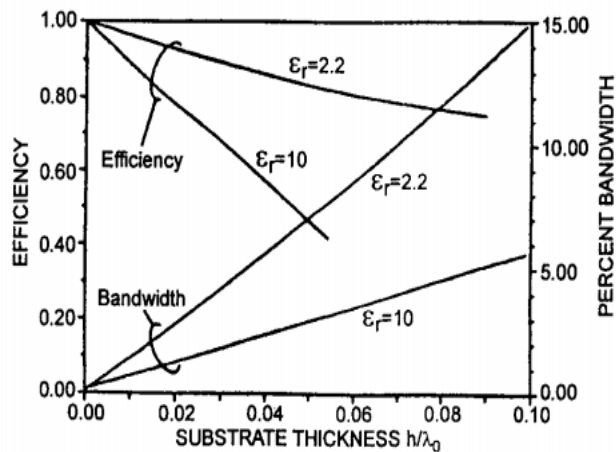
**Figura 1.13. Alimentación de un anillo cuadrado mediante un parche cuadrado acoplado.**

## 1.7 Estado del arte

La gran mayoría de conceptos básicos de las antenas de parche han sido estudiados y los principales problemas que presentaban este tipo de antenas en sus inicios han sido solucionados.

En el presente trabajo nos vamos a centrar en antenas de parche con diagrama de radiación monopolar y banda ancha, aunque también se van a tener en cuenta las antenas multifrecuencia; por tanto, se va a proceder a explicar la situación actual de este tipo de antenas.

El sustrato es un componente bastante importante de la antena, ya que como se explica en [2], una constante dieléctrica mayor que 1 provoca un menor ancho de banda, y un sustrato de espesor bajo ( $h/\lambda_0 < 0.06$ ) también disminuye el ancho de banda; también influye la eficiencia de la antena, ya que si la eficiencia baja el ancho de banda sube, aunque no tiene mucho sentido ya que bajar la eficiencia nunca es bueno, pero se puede conseguir con sustratos con tangente de pérdidas relativamente alta. Estos tres aspectos se pueden ver en la Figura 1.14.



**Figura 1.14. Efectos del sustrato sobre la eficiencia y el ancho de banda de las antenas de parche [2].**

Las dimensiones del sustrato y el plano de masa respecto al parche han sido estudiadas en detalle mediante el método de los momentos en [3], donde se demuestra que cuanto mayores son las dimensiones del sustrato y el plano de masa respecto al parche se consigue mejor ancho de banda, llegando a la conclusión de que es una parte importante del diseño de la antena.

En [4] se analiza la influencia del grosor del sustrato sobre el ancho de banda,

concluyéndose que a mayor grosor se consigue un ancho de banda mayor.

Los efectos del sustrato también han sido estudiados cuando éste es diferente del caso más común (consistente en un sustrato de un único material); en [5] se estudian los efectos que tiene un sustrato compuesto de dos capas de diferente permitividad, donde se concluye que las diferentes permitividades condicionan de forma clara la frecuencia de resonancia del modo dominante TM<sub>11</sub>. También se puede observar que la reactancia de entrada tiene como valor máximo aproximadamente 20  $\Omega$  para el valor más bajo de permitividad; al final de todo se muestran los resultados que muestran que cuando la permitividad es muy alta, la resistencia de entrada toma valores elevados (cerca de 100  $\Omega$ ) mientras que cuando la permitividad es 1 (aire o vacío) la resistencia de entrada se mantiene muy cerca de 50  $\Omega$ , y como se adapta a 50  $\Omega$ , implica que a menor permitividad mayor ancho de banda.

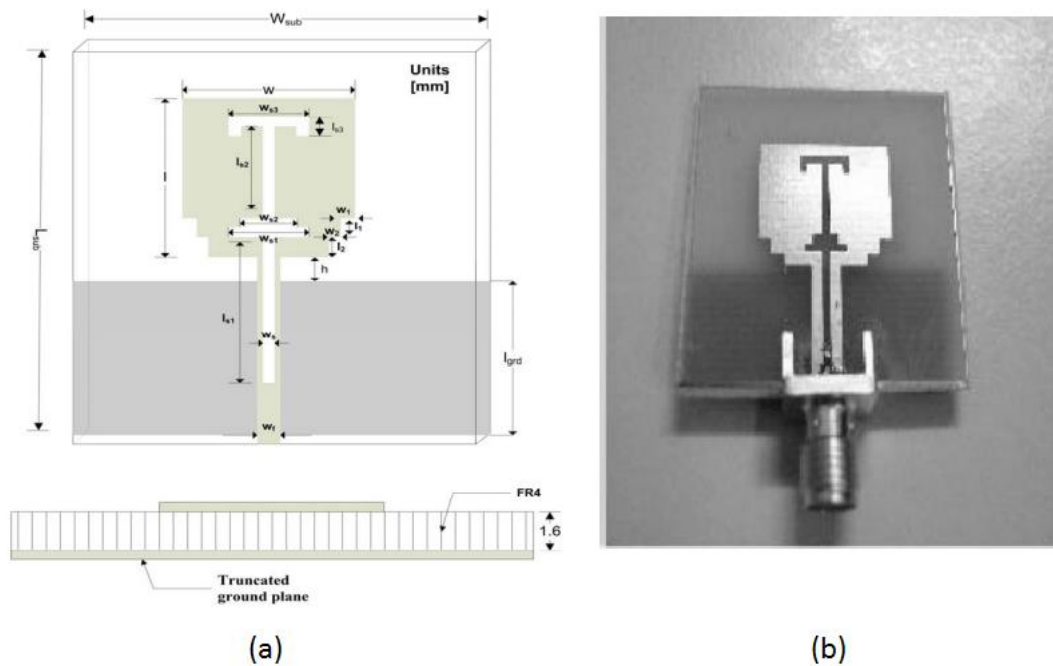
En ciertas aplicaciones se suelen integrar las antenas de parche sobre sustratos de alta permitividad y espesor, lo que implica un bajo rendimiento; en [6] se propone hacer perforaciones en las partes del sustrato que rodean la antena para bajar la permitividad efectiva del sustrato, demostrándose cierta mejora en los diagramas de radiación.

El ancho de banda ha sido objeto de estudio durante muchos años, en los cuales se ha conseguido desarrollar técnicas para el aumento del ancho de banda (casi con totalidad para el modo fundamental TM<sub>11</sub> en el caso de parches circulares).

Se ha trabajado bastante sobre diferentes formas de los parches que mejoren el ancho de banda; una geometría adecuada puede provocar que se creen nuevas resonancias, que si se juntan con las originales crean antenas de banda ancha. Como se puede ver



en [7], se consigue un ancho de banda del 21.79% con una forma muy particular del parche (una especie de W) y con un alimentación que es bastante compleja de diseñar y construir. En [8] se detalla una estructura compleja ya que aparte de la forma del parche (que no es de las canónicas) también tiene ranuras y una alimentación en L; con todo esto se consigue un ancho de banda del 63%, que es bastante bueno, a lo que hay que añadir que el diagrama de radiación tiene bastante estabilidad a lo largo de la banda. En [9] se presenta un diseño bastante complejo, ya que la propia forma del parche es muy diferente de las canónicas y en el parche hay un slot (desde la línea microstrip de alimentación hasta el parche) con una geometría compleja (la estructura de la antena se puede ver en la Figura 1.15 ; esta estructura provoca que existan gran cantidad de resonancias, que unidas dan lugar a un ancho de banda enorme que cubre la banda de 3.5 GHz a 10.5 GHz; la gran desventaja, aparte del complejo diseño, es que el diagrama de radiación no es muy parecido al original del modo TM<sub>11</sub> y no es estable en toda la banda.



**Figura 1.15. Estructura de la antena [9]. (a) Esquema de la antena. (b) Antena fabricada.**

También se han probado otras geometrías para los parches, como por ejemplo los fractales, que pueden ayudar a reducir las dimensiones de la antena; esto puede ser interesante para frecuencias bajas que suelen llevar asociadas antenas de grandes dimensiones. En [10] se estudia una antena con forma fractal y con alimentación por línea acoplada en T; si se quiere reducir el tamaño de la antena (aproximadamente un 68%) se puede conseguir un ancho de banda del 17%, pero si lo que se quiere es aumentar el ancho de banda se consigue el 25%. En [11] se presenta otra estructura fractal más simple que en el caso anterior pero con dos parches apilados, de forma que

se consigue un ancho de banda del 18.3%; otras ventajas de esta antena son que la radiación trasera es muy baja y que la directividad se mantiene bastante estable en toda la banda de funcionamiento.

Se han desarrollado prototipos como [12] que utilizan varias técnicas para mejorar el ancho de banda; en este caso se utilizan parches con formas poco comunes y con ranuras, con dos parches apilados y una alimentación por línea acoplada en L. De este modo se consiguen resultados bastante buenos: un ancho de banda del 33%, un nivel de polarización cruzada de -35 dB, un diagrama de radiación broadside y una ganancia muy estable en toda la banda de funcionamiento. La única desventaja de la antena es su compleja construcción y diseño. En [13] se presenta un diseño que no se puede considerar como una antena de parche pura, ya que además del propio parche incluye un monopolo y tres postes de cortocircuito. El ancho de banda es muy grande, ya que la banda de adaptación va de 1.5 GHz a 10.6 GHz; por otra parte, el diagrama de radiación no es bueno y la ganancia a lo largo de la banda varía mucho, ya que va de 2.3 dB a 4.5 dB. En [14] se utilizan varias técnicas para mejorar el ancho de banda, ya que proponen una antena en la que como sustrato hay aire (constante dieléctrica casi 1), la separación entre plano de masa y parche es del orden de  $h/\lambda_0 = 0.13$  que es bastante alto y se utiliza una alimentación por línea acoplada, obteniendo con este diseño un ancho de banda de entre el 30% y el 35%.

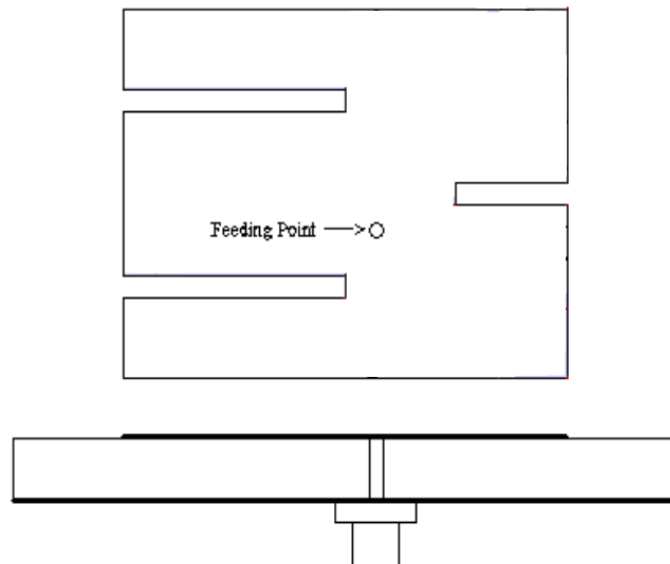
En cuanto a las antenas multifrecuencia, al aparecer modos superiores al fundamental, siempre han existido, pero no a frecuencias ajustables; es decir, que sólo se puede escoger una frecuencia, las otras están condicionadas por la geometría del parche, todo esto aplicable a la estructura de parche más simple, ya sea rectangular o circular.

Se han propuesto diversas geometrías para hacer funcionar las antenas en varios modos, como por ejemplo en [15], donde se explica la geometría de una antena de parche circular cortocircuitada con el plano de masa en el centro que funciona a dos frecuencias ajustables, y cada una de ellas radiando de forma distinta; la frecuencia más baja radia monopolar y la frecuencia superior radia broadside. En este artículo se analiza la antena como una cavidad, obteniéndose expresiones tanto de qué modos y a qué frecuencia aparecen como de impedancia de entrada y de radiación.; también se presenta un prototipo de antena que cubra las bandas de GSM (900MHz) con radiación monopolar la banda de GPS (1575MHz) con radiación broadside. También se incluye una gráfica que relaciona las dimensiones de la antena con las constantes asociadas a cada modo que determinan su frecuencia de resonancia.

Otros estudios de antenas multifrecuencia, como [16], proponen una estructura en forma de parche circular con stubs en los extremos, en la cual hay dos frecuencias de adaptación ajustables (dentro de un rango) que radian de forma cónica, aunque hay

que tener presente que el diagrama de radiación de las diferentes frecuencias es bastante diferente y con nulos de radiación para determinados valores de  $\theta$ . Las dos frecuencias de interés son ajustables mediante la longitud de los stubs, que establecen la relación entre frecuencias; la relación mínima es 1.2 y la máxima 1.8.

Es destacable el trabajo que se ha realizado variando la forma de los parches para conseguir antenas multifrecuencia. En [17] se plantea un parche circular con una ranura que va desde el centro hasta casi el extremo del parche; de esta forma, se consiguen cuatro frecuencias de radiación que adaptan a buen nivel, aunque solo las dos frecuencias más bajas presentan buena eficiencia de radiación y directividad. En las dos frecuencias más bajas el diagrama de radiación es broadside y casi idéntico en las dos frecuencias. En [18] se presenta una antena con una forma muy particular (Figura 1.16), ya que es un parche rectangular con varios slots; debido a esta geometría aparecen cuatro frecuencias de resonancia, dos de las cuales están muy juntas (la segunda y la tercera). La ganancia máxima es bastante estable en las tres primeras frecuencias, en la cuarta baja alrededor de 4 dB. Las relaciones que existen entre la frecuencia más baja y las superiores son 1.285, 1.322 y 1.642. En [19] se estudia una antena cuya forma es bastante compleja, ya que por la cara superior del parche tiene dos slots rectangulares y por la cara inferior dos slots elípticos; se consiguen tres frecuencias de funcionamiento. La ganancia máxima es alrededor de 4 dBi en las tres frecuencias de funcionamiento.



**Figura 1.16. Esquema de la estructura de la antena propuesta en [18].**

Se han utilizado otras técnicas para que aparezcan más frecuencias, como por ejemplo apilar parches, que mediante acoplamiento magnético se excitan y radian en una frecuencia ligeramente diferente del parche principal, como se explica en [2]. Las dos

frecuencias que aparecen (la original y la del elemento acoplado) pueden ser ajustables dentro de un margen o mantener una relación fija.

En cuanto a antenas de parche con diagrama de radiación monopolar, hay que destacar que no siempre se consigue un diagrama de radiación igual al monopolar ideal pero si muy parecido.

Ha sido estudiado en varias estructuras, concretamente en [15] se analiza una estructura de parche circular cortocircuitado centrándose en el funcionamiento del modo TM<sub>01</sub>, explicando su frecuencia de funcionamiento, diagrama de radiación y ancho de banda, que es bastante escaso para los sistemas de comunicaciones actuales. El diagrama de radiación es muy parecido al monopolar puro, una gran ventaja de esta antena.

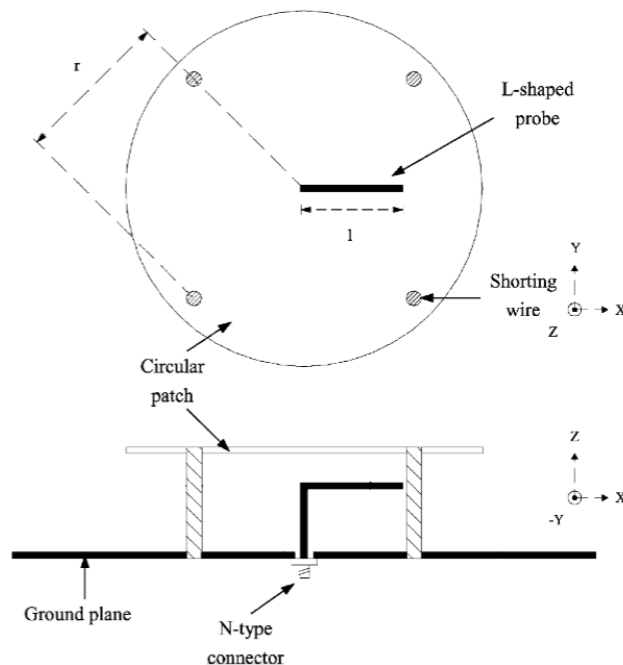
Una aproximación de parche monopolar de banda ancha se puede encontrar en [20] donde se tiene un diagrama de radiación con similitudes al monopolar y ancho de banda en torno al 30%. El problema principal es que el diagrama de radiación no es muy bueno porque no es estable a lo largo de la banda de funcionamiento, tiene una ganancia elevada y se van formando varios lóbulos según aumenta la frecuencia, lo que limita bastante las aplicaciones de esta antena.

En [21] se presenta una estructura de parche circular con varios pines de cortocircuito situados a una determinada distancia del centro del parche; con esta estructura se consigue un ancho de banda del 18%. Es interesante la baja altura de la antena, y como principales inconvenientes de la antena se encuentran la dificultad de fabricación, la diferencia que existe entre su diagrama de radiación y el monopolar y la variación de la ganancia a lo largo de la banda de funcionamiento, con diferencias de casi 5 dB. Sobre la base de esta estructura, en [22] se presenta un parche en forma de anillo con un parche circular en su interior con varios pines de cortocircuito; con estas modificaciones, se consigue un ancho de banda del 27.4%. Además se consigue reducir todavía más la altura de la antena; como parte negativa, el diagrama de radiación empeora ligeramente.

En [23] se estudia una antena formada por un anillo cuadrado con paredes de cortocircuito con alimentación por parche acoplado. El ancho de banda que se consigue puede llegar hasta el 50%; el diagrama de radiación tiene bastante parecido al monopolar con cierta variación a lo largo de la banda de funcionamiento sobre todo en la ganancia máxima. Hay que considerar que el nivel de radiación contrapolar es bastante alto. En [24] se trabaja sobre la antena anterior cambiando el aire como sustrato por espuma, consiguiendo un ancho de banda del 70%; el diagrama de radiación cambia a lo largo de la frecuencia de funcionamiento de forma importante teniendo un nivel de radiación contrapolar alto.

En [25] se estudia un parche cuadrado con paredes de cortocircuito y alimentación por parche acoplado, en el cual se consigue un ancho de banda del 50% con un diagrama de radiación bastante parecido al monopolar en determinadas frecuencias de funcionamiento; en otras frecuencias de la banda de funcionamiento el diagrama de radiación cambia, así como la ganancia máxima. También hay que tener en cuenta que el nivel de radiación contrapolar es alto.

En [26] se explica el funcionamiento de una antena de parche circular con cuatro pines de cortocircuito y alimentación en L (Figura 1.17); el ancho de banda conseguido es del 27.1% y el diagrama de radiación en el centro de la banda es prácticamente idéntico al monopolar. Además, la ganancia máxima no presenta grandes variaciones a lo largo de la banda de funcionamiento; el único inconveniente de la antena es que presenta un nivel de radiación contrapolar considerable.



**Figura 1.17. Estructura de la antena propuesta en [26].**

## 2. Estrategias básicas para diseñar parches con diagrama de radiación monopolar

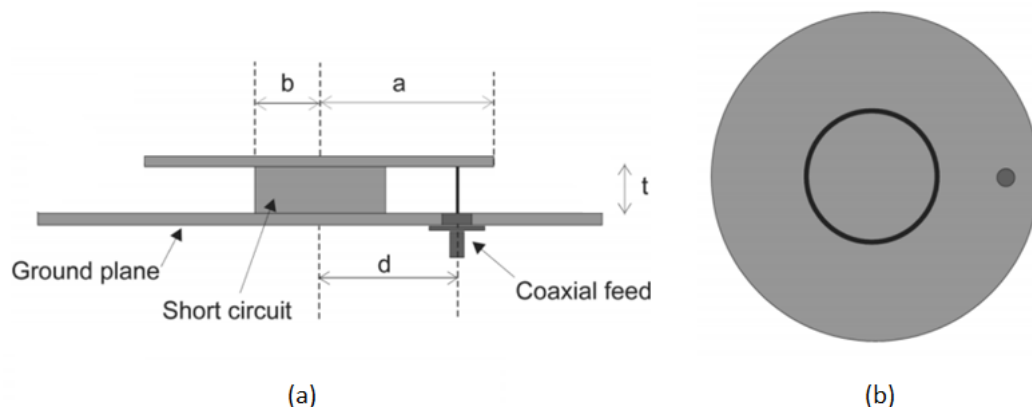
En el presente capítulo se explicarán los estudios realizados sobre las antenas propuestas para conseguir un diagrama de radiación monopolar.

### 2.1 Parche circular cortocircuitado en el centro

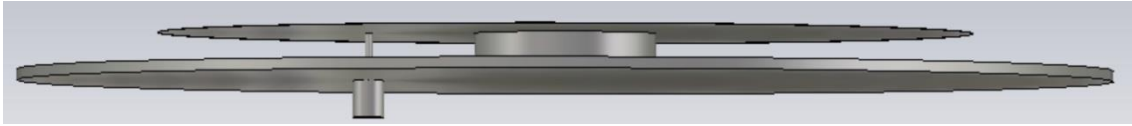
#### 2.1.1 Estructura y dimensiones de la antena

A modo de introducción de los experimentos realizados en este trabajo de fin de grado, la primera antena que se va a presentar es la base sobre la que se van a crear las siguientes antenas; de esta forma, se tienen unas prestaciones iniciales de las que partir (generalmente de ancho de banda) sobre las cuales se puede comparar para ver las mejoras que presentan las diferentes antenas probadas.

El diseño es bastante simple (Figuras 2.1.1 y 2.1.2): consiste en un plano de masa, un cilindro de cortocircuito y el parche circular. No se va a utilizar dieléctrico para simplificar el diseño, aparte de no ser necesario para sostener el parche como en los parches convencionales. La alimentación que se va a utilizar es mediante cable coaxial.



**Figura 2.1.1. Esquema de la estructura de la antena 2.1. (a) Vista de perfil. (b) Vista de planta [15].**



**Figura 2.1.2. Modelo en tres dimensiones de la antenna 2.1**

Las dimensiones de la antenna propuesta son (de acuerdo a la figura anterior):

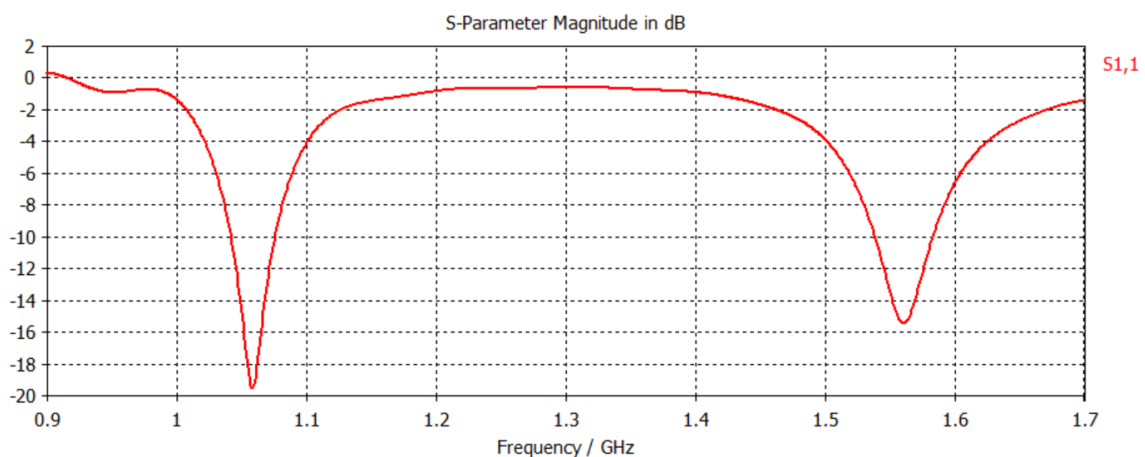
- $a=55.83$  mm
- $b=12.42$  mm
- $d=26.89$  mm
- $t=5$  mm

Se ha diseñado la antenna con estas dimensiones porque la intención es cubrir la banda de radionavegación aérea con la primera resonancia que tiene un diagrama de radiación monopolar y cubrir la banda de GPS con la segunda resonancia que tiene diagrama de radiación de tipo broadside.

### 2.1.2 Adaptación y diagrama de radiación de la antenna

La gráfica de adaptación se puede ver en la Figura 2.1.3. Se tiene una resonancia muy marcada y de poco ancho de banda (34 MHz que es el 3.2%) alrededor de  $f=1060$  MHz (que es la frecuencia central de la banda de radionavegación aérea) y otra resonancia no tan marcada de ancho de banda ligeramente menor (45 MHz que es el 2.9%) en  $f=1575$  MHz que es la frecuencia de GPS.

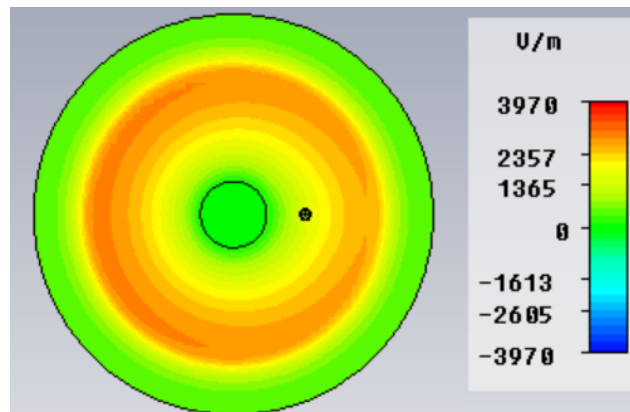
A la frecuencia de 1060 MHz tiene un ancho de banda de 34 MHz, insuficiente ya que el objetivo son 260 MHz.



**Figura 2.1.3. Gráfica de adaptación de la antenna 2.1.**

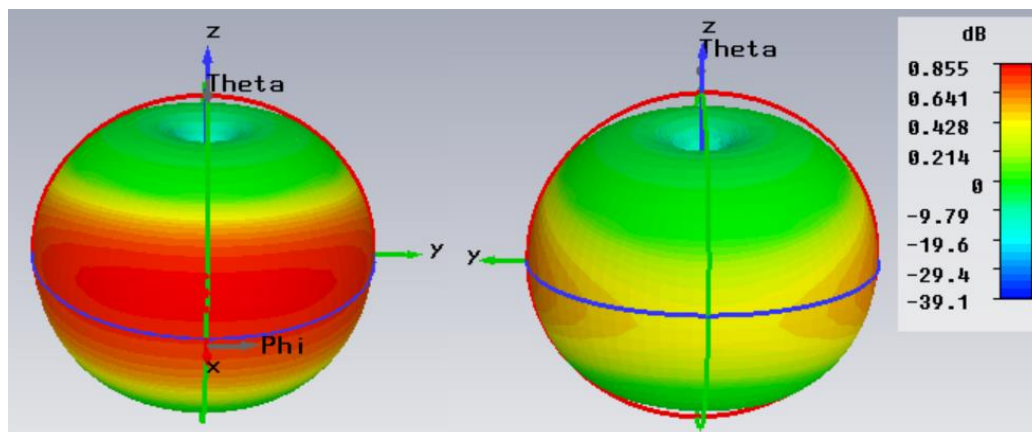
Es interesante analizar tanto los campos eléctricos que se crean en el interior del parche como el diagrama de radiación que producen.

A la frecuencia más baja (1060 MHz), el campo eléctrico en dirección z se puede ver en la Figura 2.1.4. Tiene la típica distribución de campo propia de los modos TM<sub>0</sub>, en la cual el campo eléctrico en dirección z en los puntos cortocircuitados es nulo y la variación del campo con la variación del ángulo es muy pequeña (distribución de campo uniforme); la distribución de campo no es ideal ya que la alimentación modifica las condiciones de la estructura.



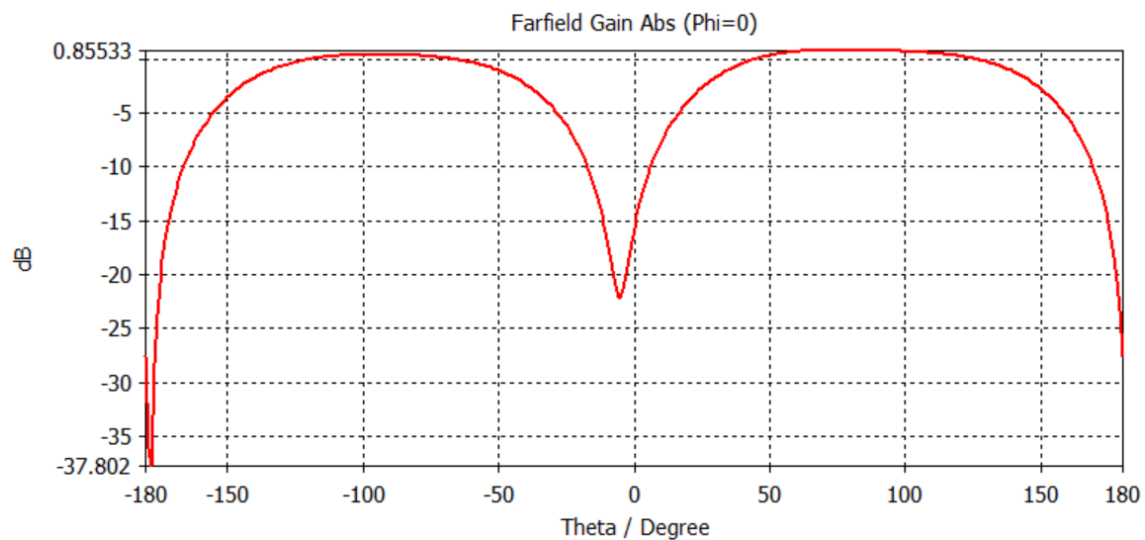
**Figura 2.1.4. Campo eléctrico en dirección z del modo TM<sub>0</sub>1.**

Como consecuencia del campo explicado anteriormente, presenta el diagrama de radiación de la Figura 2.1.5. Se puede apreciar que radia con mayor directividad alrededor de la dirección donde se sitúa el coaxial de alimentación. Presenta nulos de radiación en aproximadamente  $\theta = 0^\circ$  y  $\theta = 180^\circ$  como los diagramas de radiación tipo monopolar, además de presentar el máximo de radiación en aproximadamente  $\theta = 90^\circ$ . Donde mejor se aprecian éstos detalles es en las Figuras 2.1.6 y 2.1.7, que muestran los cortes con los planos XZ y XY respectivamente.

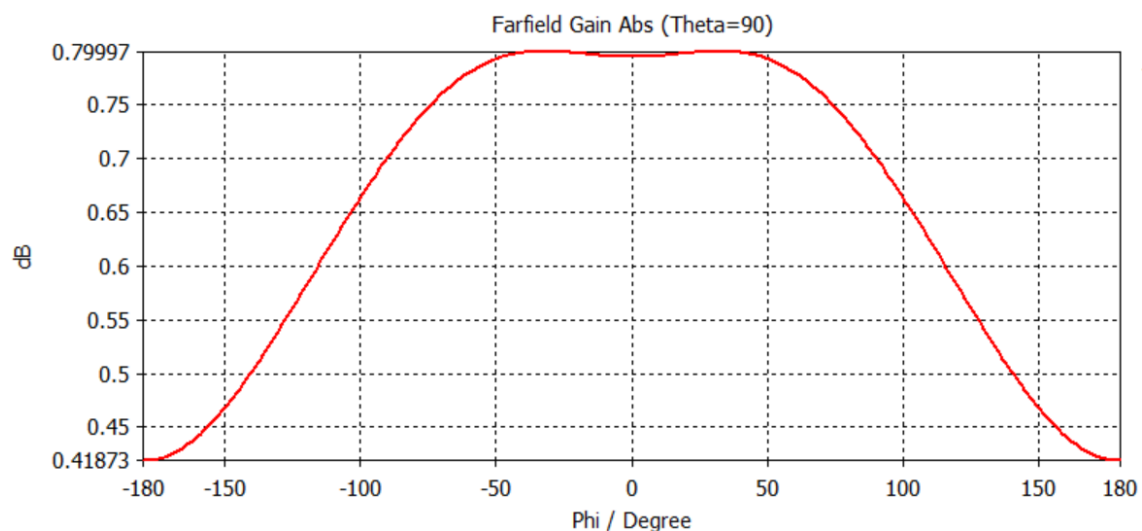


**Figura 2.1.5. Diagrama de radiación del modo TM<sub>0</sub>1.**





**Figura 2.1.6. Diagrama de radiación del modo TM01 en el plano XZ.**



**Figura 2.1.7. Diagrama de radiación del modo TM01 en el plano XY.**

A la frecuencia de 1575 MHz el campo eléctrico en la dirección z se puede ver en la Figura 2.1.8. Tiene la distribución típica del modo fundamental en los parches convencionales, con variación del campo eléctrico si cambia el ángulo alrededor del eje de simetría o la distancia al centro del parche. Es una distribución típica de un resonador  $\lambda/2$ , con los máximos de campo en contrafase en los extremos.

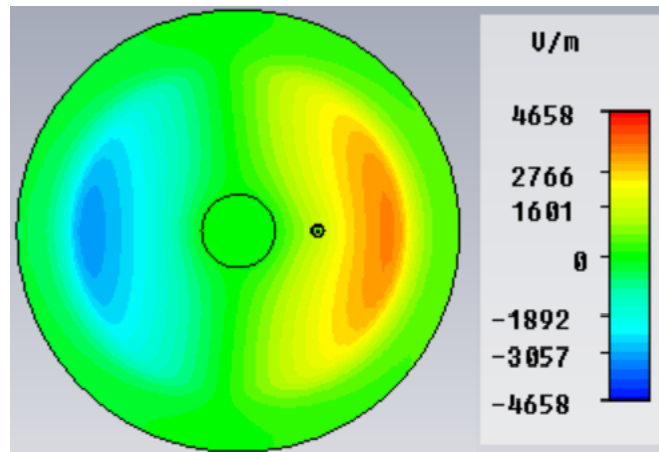


Figura 2.1.8. Campo eléctrico en dirección z del modo TM<sub>11</sub>.

Debido a esta distribución de campo, el diagrama de radiación es como muestra la Figura 2.1.9. La ganancia es de 9.4 dB en el punto de máxima radiación ( $\theta = 0^\circ$ ), por tanto es de tipo broadside. La radiación trasera es baja. Es interesante ver el diagrama de radiación en el plano XZ (Figura 2.1.10), donde se puede apreciar que la anchura de haz a -3 dB es de  $56^\circ$ .

Este tipo de diagrama de radiación puede ser útil para por ejemplo recibir información de satélites, puesto que al tener su máxima ganancia en la dirección ortogonal al plano de masa maximiza la potencia obtenida.

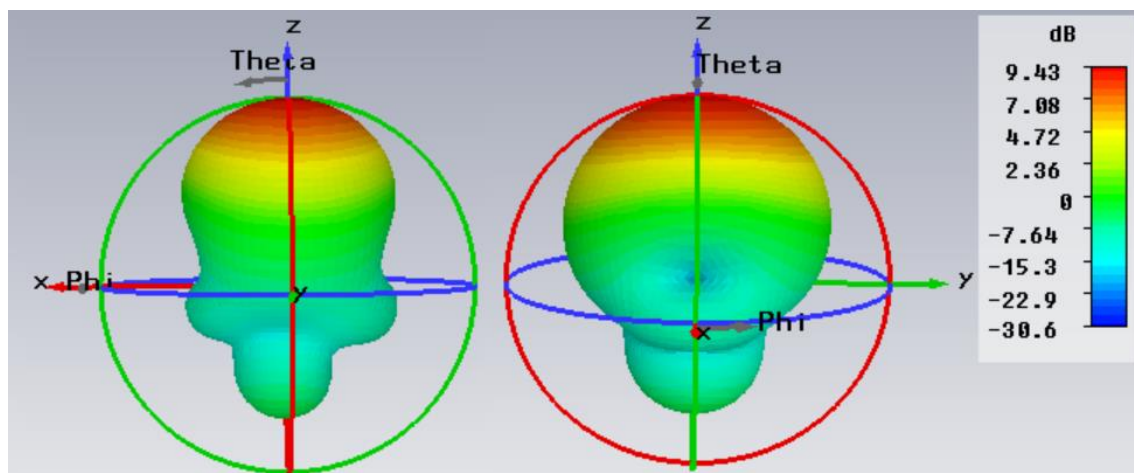
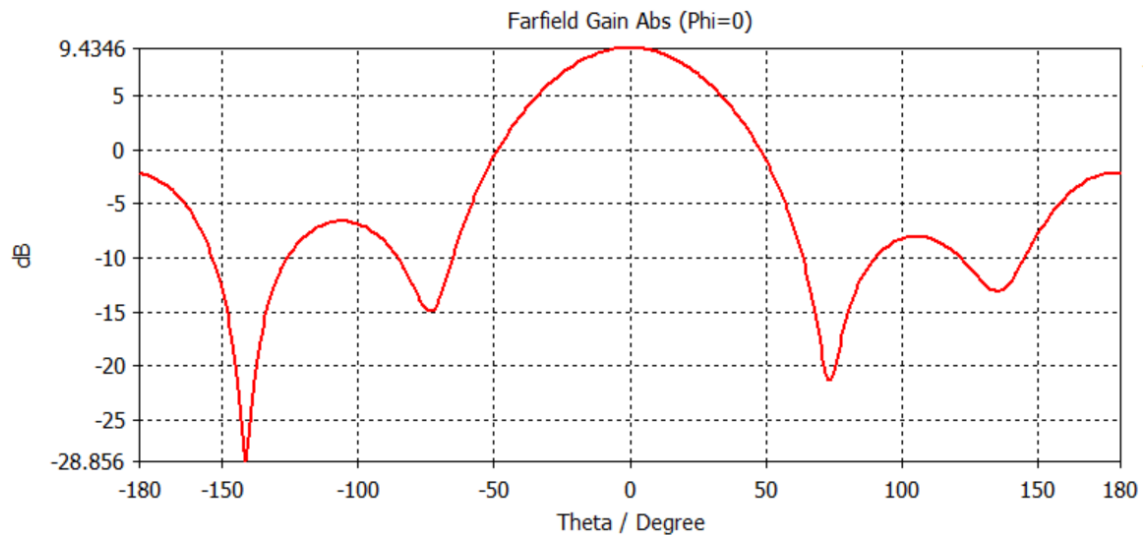


Figura 2.1.9. Diagrama de radiación del modo TM<sub>11</sub>.



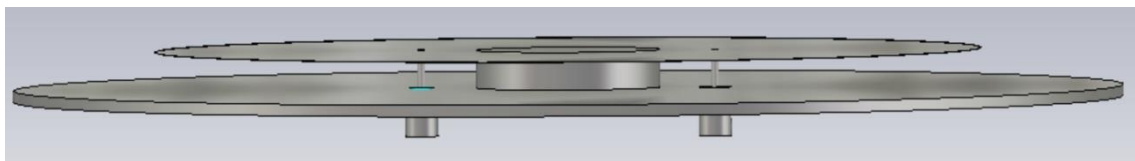
**Figura 2.1.10. Diagrama de radiación del modo TM11 en el plano XZ.**

### 2.1.3 Alimentación diferencial

Debido al insuficiente ancho de banda obtenido con la estructura anterior, se va a estudiar un cambio en la alimentación para intentar aumentar el ancho de banda.

Se ha optado por utilizar alimentación diferencial ya que es un método utilizado en otros casos y que funciona.

Las dimensiones de la antenna son iguales que las propuestas en el caso anterior, con el único cambio de que ahora en lugar de haber un coaxial hay dos colocados simétricos, ambos a la misma distancia del centro del parche. Se puede ver en la Figura 2.1.11.

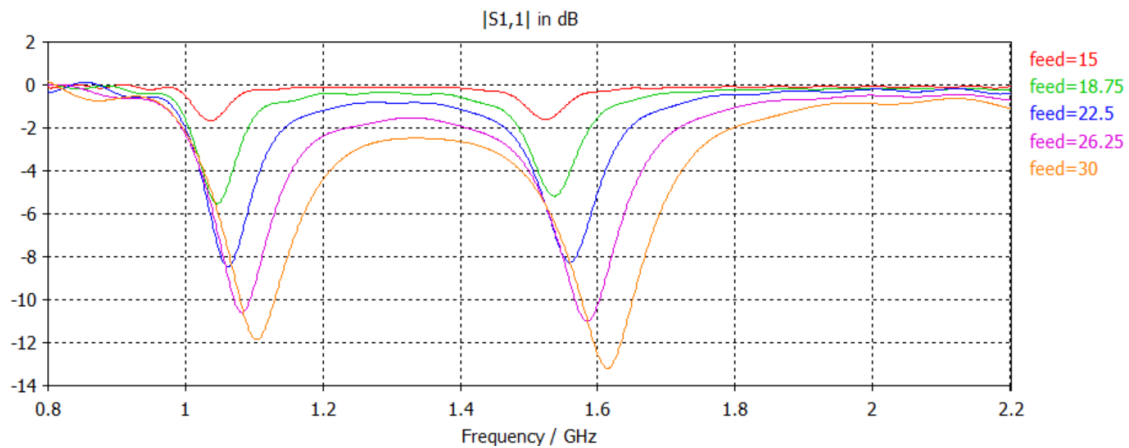


**Figura 2.1.11. Modelo en tres dimensiones de la antenna con alimentación diferencial.**

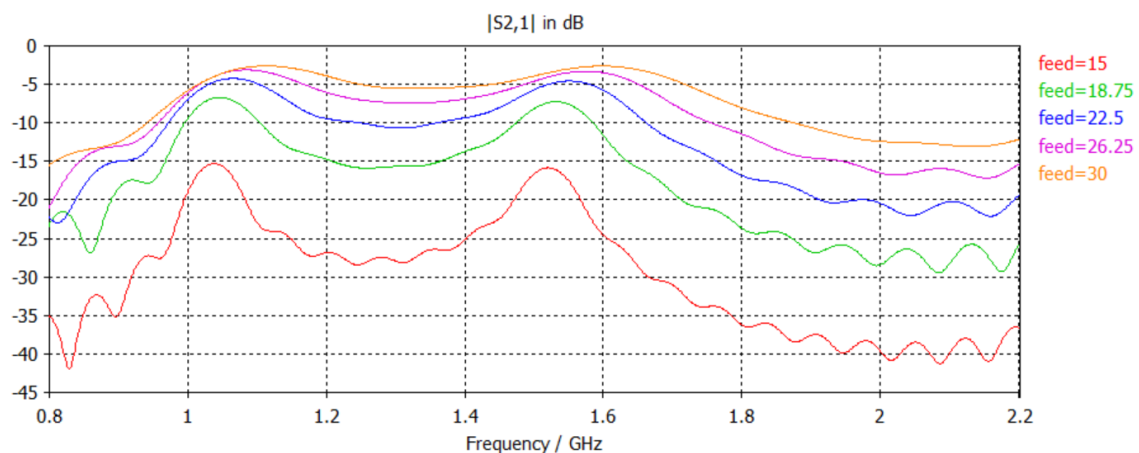
Debido a que se utiliza alimentación diferencial, va a ser muy importante el acoplo entre puertos, puesto que si los puertos se acoplan potencia entre sí la antenna no va a radiar prácticamente nada y va a ser muy ineficiente.

Como se utilizan coaxiales, es muy fácil cambiar el coeficiente de reflexión visto a la entrada de los puertos con sólo cambiar la posición. El principal problema que se ha

encontrado es que, si el coeficiente de reflexión es bajo, el acoplo entre puertos es grande y si el acoplo entre puertos es bajo el coeficiente de reflexión es alto. Esto se puede apreciar en las Figuras 2.1.12 y 2.1.13, en las cuales se puede ver el parámetro de reflexión ( $|S_{11}|$ ) y el parámetro de transmisión ( $|S_{21}|$ ) para diferentes puntos de alimentación.



**Figura 2.1.12. Parámetros  $|S_{11}|$  para diferentes valores del punto de alimentación diferencial.**



**Figura 2.1.13. Parámetros  $|S_{21}|$  para diferentes valores del punto de alimentación diferencial.**

Como se puede apreciar, las frecuencias de funcionamiento de la antena se ven modificadas respecto a la original por el hecho de existir dos puertos, y también varían considerablemente al cambiar el punto de alimentación. En este caso no se va a diseñar la antena para funcionar a las frecuencias objetivos, ya que la meta de estas pruebas es comprobar si el ancho de banda se ve aumentado con este tipo de alimentación.

El valor del punto de alimentación se puede optimizar, ya que la potencia entregada a la antena se puede aproximar como:

$$P_{entregada} \approx P_{disponible} \cdot (1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)$$

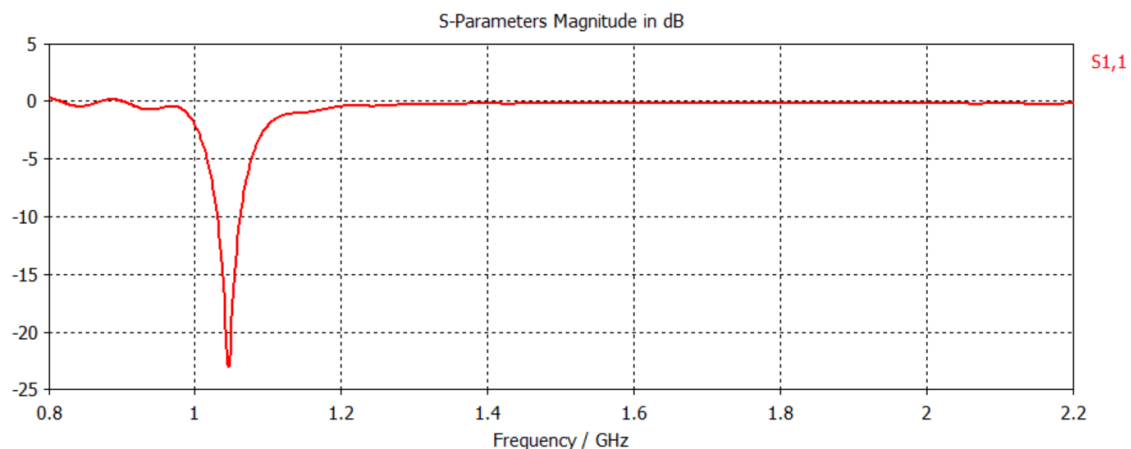
Optimizando el punto de alimentación, se obtiene que el punto de alimentación vale 18.75 mm; los parámetros S11 y S21 pueden ser vistos en la gráfica de arriba. Los resultados del factor  $(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)$  para cada valor del punto de alimentación a la frecuencia de funcionamiento inferior se pueden ver en la siguiente tabla:

Punto de alimentación (mm)	S11 (dB)	S21 (dB)	$(1 -  S_{11} ^2 -  S_{21} ^2)$
15	-1.68	-15.34	0.5378
18.75	-5.52	-6.75	0.8766
22.5	-8.47	-4.3	0.8417
26.25	-10.58	-3.18	0.7611
30	-11.83	-2.69	0.706

Ahora, al existir dos puertos y el objetivo ser una antena de un único puerto, se coloca entre el puerto de alimentación y la antena un divisor de potencia Wilkinson simétrico con la siguiente matriz de parámetros S a la frecuencia de funcionamiento inferior:

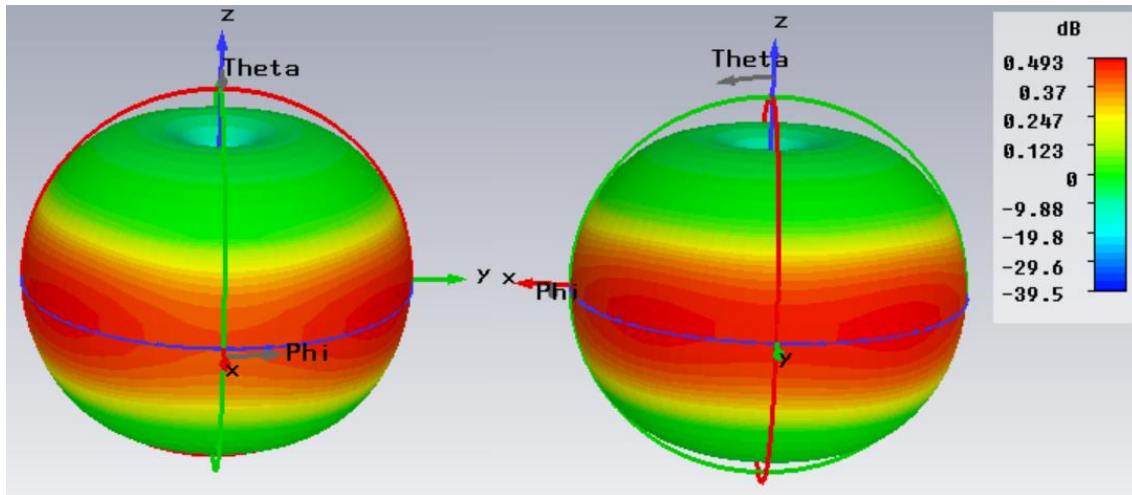
$$S = \frac{-j}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La gráfica de adaptación obtenida a la entrada del divisor Wilkinson se puede ver en la Figura 2.1.14. Como se puede apreciar, solo adapta la frecuencia de funcionamiento inferior y el ancho de banda no ha mejorado. Ha pasado de 34 MHz (3.2%) a 31.5 MHz (3.01%), por tanto no merece la pena este tipo de alimentación si se hace para aumentar el ancho de banda, ya que en lugar de aumentar lo que hace es disminuir.

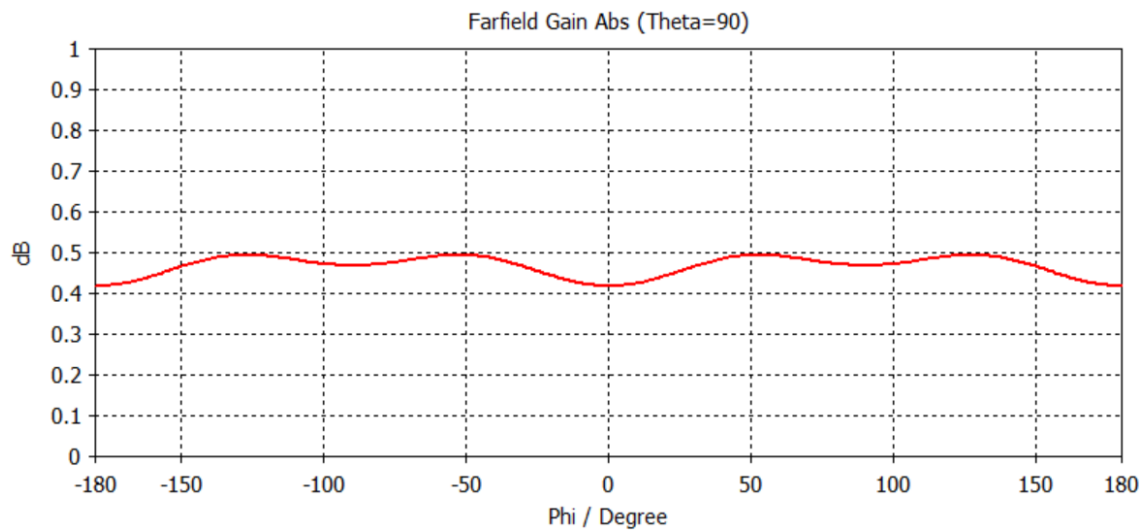


**Figura 2.1.14. Pérdidas de retorno a la entrada del divisor Wilkinson.**

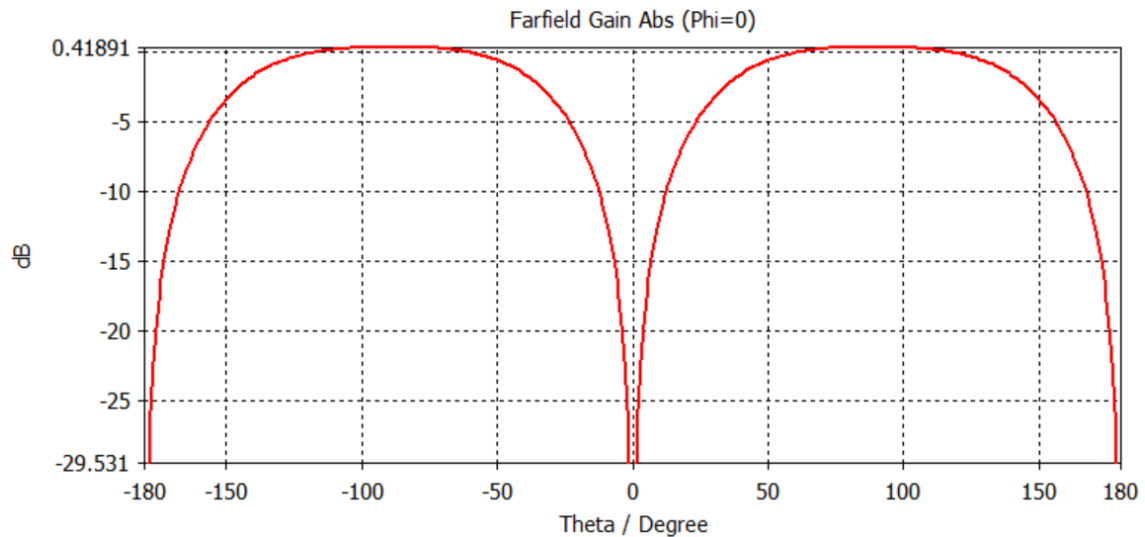
En las Figuras 2.1.15, 2.1.16 y 2.1.17 se puede observar que el diagrama de radiación tiene mucha similitud con el monopolar, siendo bastante mejor que en el caso anterior. Si se requiere un diagrama de radiación monopolar, sin duda este tipo de alimentación es interesante. En el corte con el plano XY la diferencia entre ganancia máxima y mínima es de 0.08 dB, un valor despreciable; los nulos de radiación están claramente en  $\theta = 0^\circ$  y  $\theta = 180^\circ$ .



**Figura 2.1.15. Diagrama de radiación del modo TM01 con alimentación dual.**



**Figura 2.1.16. Diagrama de radiación del modo TM01 en el plano XY con alimentación diferencial.**



**Figura 2.1.17. Diagrama de radiación del modo TM01 en el plano XZ con alimentación diferencial.**

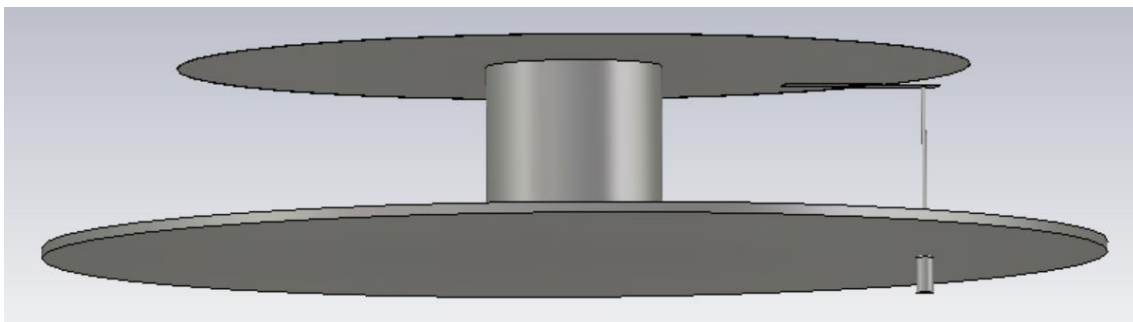
## 2.2 Parche circular cortocircuitado con alimentación por acoplo en L

### **2.2.1 Estructura y dimensiones de la antena**

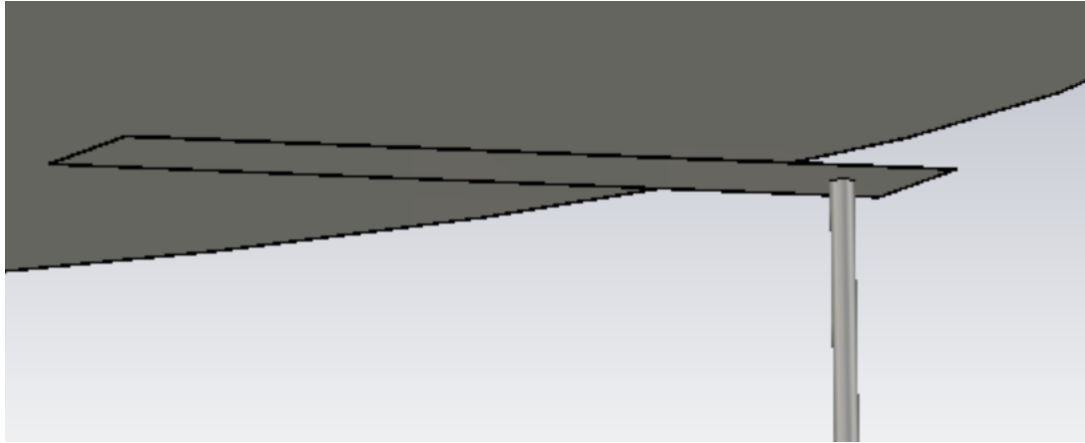
En esta antena se trabaja sobre la estructura del caso anterior. Los cambios que se introducen son dos:

- Aumento de la separación entre plano de masa y parche
- Alimentación por línea acoplada o L

En las Figuras 2.2.1 y 2.2.2 se puede observar la estructura de la nueva antena, así como la alimentación utilizada.



**Figura 2.2.1. Modelo en tres dimensiones de la antena 2.2.**



**Figura 2.2.2. Modelo detallado en tres dimensiones de la alimentación.**

Las dimensiones de la antena propuesta son (de acuerdo a la Figura 2.1.1):

- $a=55.83 \text{ mm}$
- $b=12.42 \text{ mm}$
- $t=25 \text{ mm}$

Las dimensiones de la alimentación son:

- Altura respecto al plano de masa= $22.6 \text{ mm}$
- Longitud de la línea= $20 \text{ mm}$
- Anchura de la línea= $5 \text{ mm}$

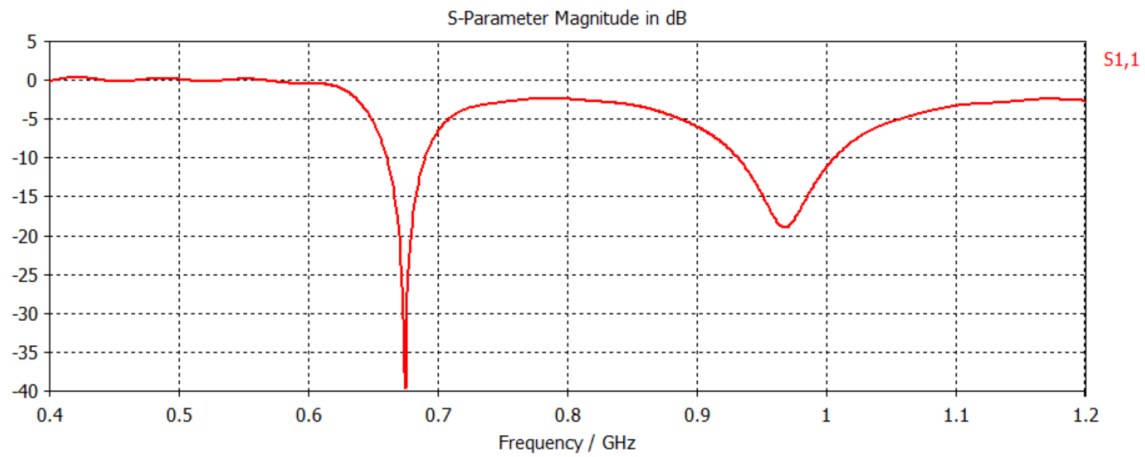
### **2.2.2 Adaptación y diagrama de radiación de la antena**

Se obtiene la gráfica de adaptación de la Figura 2.2.3. Como se puede observar claramente, las frecuencias de funcionamiento bajan mucho al existir mayor separación entre plano de masa y parche.

Comparándolo con la antena original, en el modo TM01 se puede observar que el ancho de banda aumenta de  $34 \text{ MHz}$  (3.19%) a  $34 \text{ MHz}$  (5%); en porcentaje es superior debido a que la frecuencia central es menor.

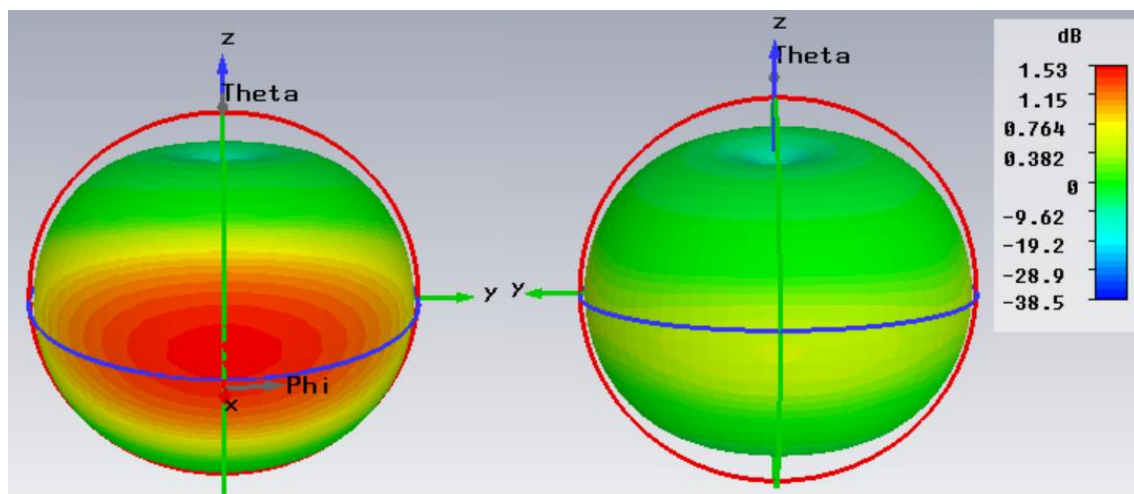
En el modo TM11 el ancho de banda aumenta de  $45 \text{ MHz}$  (2.9%) a  $76 \text{ MHz}$  (7.84%).



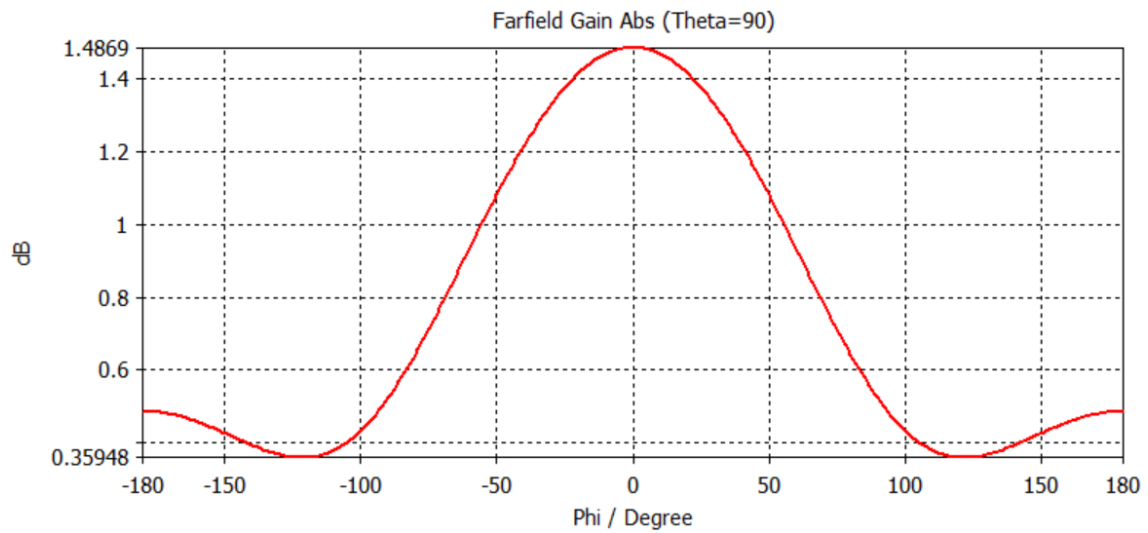


**Figura 2.2.3. Gráfica de adaptación de la antena 2.2.**

El diagrama de radiación a la frecuencia del modo TM01 (674 MHz) se puede ver en la Figura 2.2.4. Se puede apreciar que es peor que en la antena original, ya que cada vez se asemeja más a un diagrama tipo endfire; radia con más ganancia hacia la dirección donde se sitúa la alimentación. Esto se puede apreciar mejor en el corte con el plano XY de la Figura 2.2.5, ya que hay una diferencia de 1.12 dB entre el punto de máxima ganancia (1.48 dB) y el de mínima ganancia (0.36 dB).

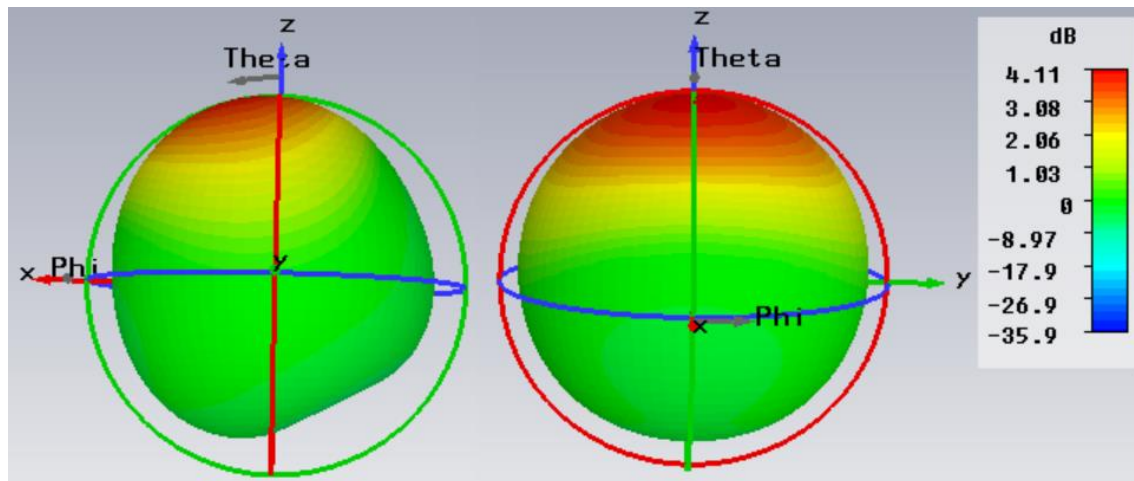


**Figura 2.2.4. Diagrama de radiación del modo TM01.**

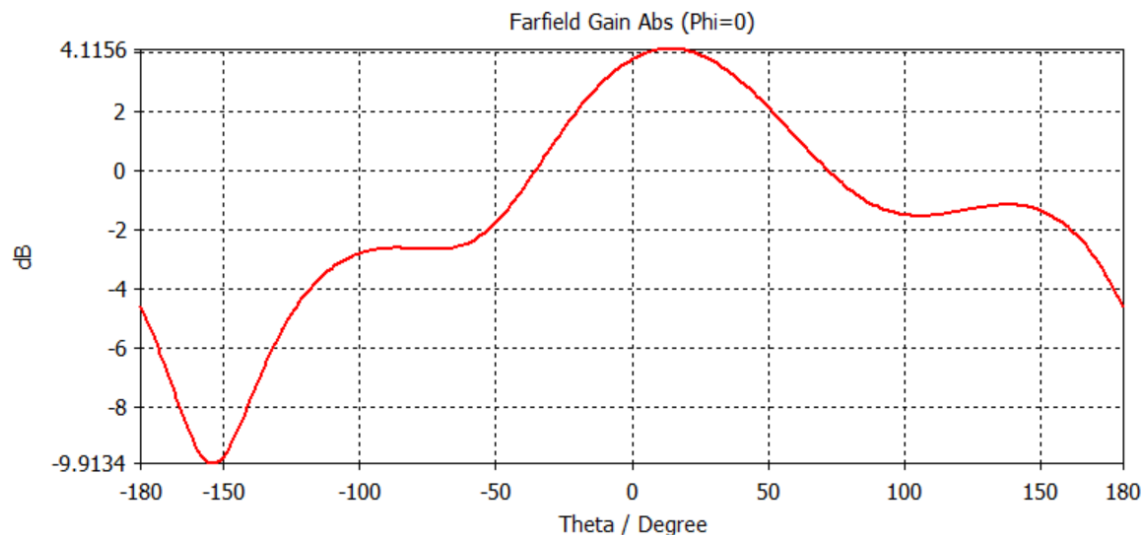


**Figura 2.2.5. Diagrama de radiación del modo TM01 en el plano XY.**

El diagrama de radiación de la segunda resonancia (968 MHz) se puede ver en la Figura 2.2.6. Se puede apreciar que el máximo de radiación ya no se encuentra en  $\theta = 0^\circ$ , sino que aparece en  $\theta = 13^\circ$ . También se puede apreciar que la ganancia máxima ha bajado desde 9.43 dB hasta 4.11 dB. En el corte con el plano XZ de la Figura 2.2.7 se observa que el ancho de haz a -3 dB ha pasado de  $56^\circ$  a  $87^\circ$ .



**Figura 2.2.6. Diagrama de radiación del modo TM11.**



**Figura 2.2.7. Diagrama de radiación del modo TM11 en el plano XZ.**

De los resultados obtenidos, se puede deducir que esta antena puede ser utilizada cuando se requiera mayor ancho de banda que con la original y no sean necesarios diagramas de radiación estables en todo  $\phi$  para el modo TM01 ni muy directivos para el modo TM11.

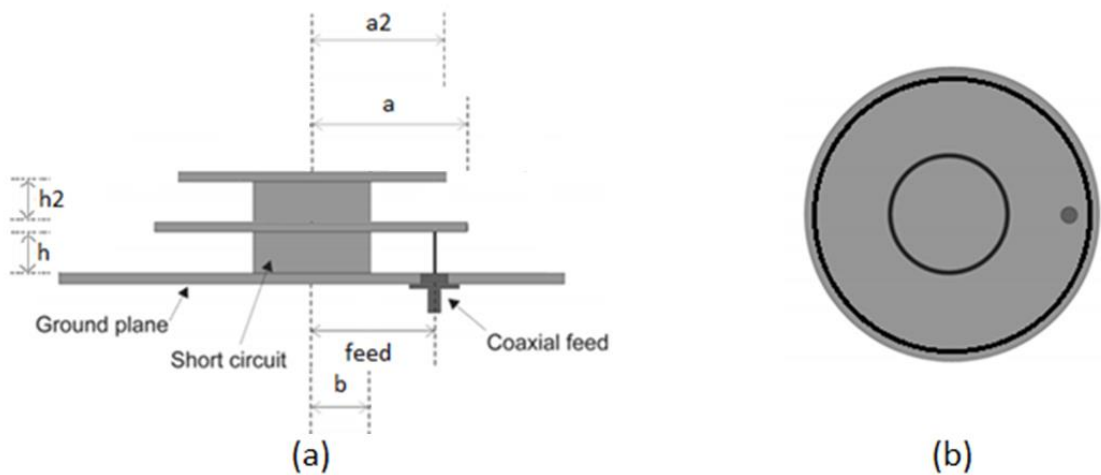
También hay que tener en cuenta que el perfil de esta antena es más elevado que las anteriores, por tanto puede presentar problemas a la hora de ser integrada en superficies planas; en cambio, con las mismas dimensiones que la antena anterior funciona a frecuencias más bajas, con lo cual si se quiere hacer funcionar esta antena en las frecuencias propuestas en la otra antena tendría unas dimensiones más reducidas.

## 2.3 Parche circular cortocircuitado con parche apilado

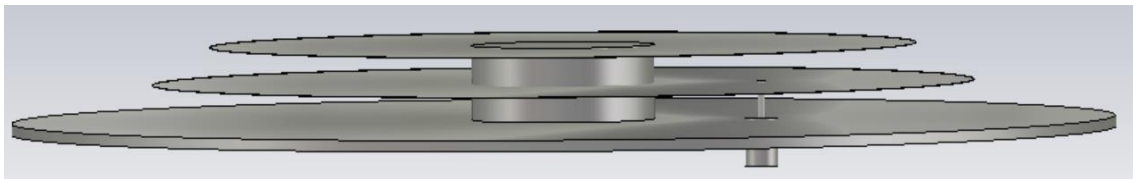
### **2.3.1 Estructura y dimensiones de la antena**

La siguiente antena es parecida a la presentada en el primer apartado, con el único cambio de que en lugar de haber un solo parche, en este caso hay dos parches, uno de los cuales (el inferior) está directamente alimentado por el coaxial y el otro (el apilado) se excita por acoplo magnético. El parche apilado tiene unas dimensiones muy parecidas al parche principal, aunque no iguales; de este modo, al ser ligeramente inferior, se van a crear nuevas resonancias a una frecuencia ligeramente mayor que las

resonancias originales. La alimentación se realiza con un cable coaxial. La estructura de la antena se puede ver en las Figuras 2.3.1 y 2.3.2.



**Figura 2.3.1. Esquema de la estructura de la antena 2.3. (a) Vista de perfil. (b) Vista de planta.**



**Figura 2.3.2. Modelo en tres dimensiones de la antena 2.3.**

En esta antena, además de producirse nuevas resonancias debidas al parche acoplado, se cambian ligeramente las resonancias originales. Esta característica resulta muy interesante ya que nos permite trabajar sobre varias posibilidades, como pueden ser una antena multifrecuencia o juntar las resonancias que aparecen para hacer una frecuencia de funcionamiento de banda ancha.

### 2.3.2 Análisis de las frecuencias de funcionamiento y diagrama de radiación para el modo TM<sub>01</sub>

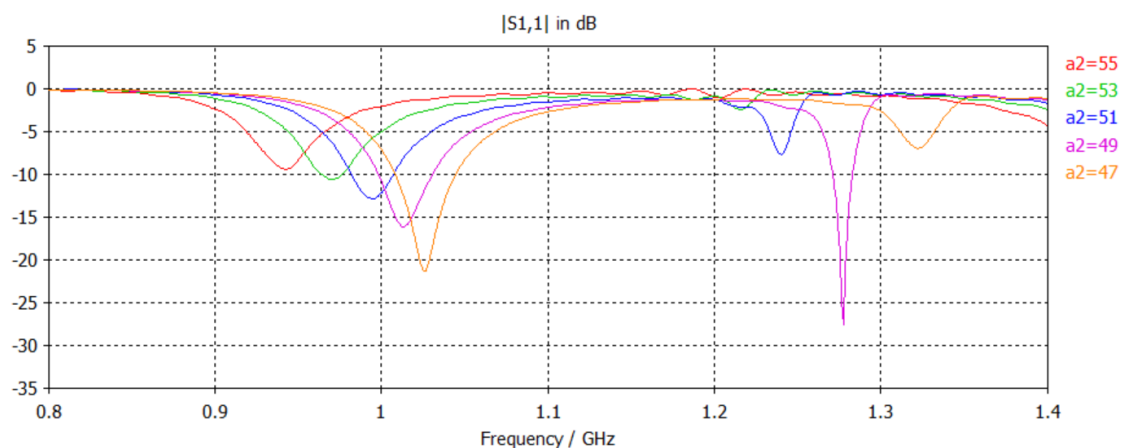
La frecuencia y nivel de adaptación de la resonancia del parche apilado cambia con varios parámetros de la geometría de la antena, como por ejemplo el radio del parche acoplado o la separación entre parches. Se van a estudiar por separado los efectos que

tienen los parámetros más importantes sobre la frecuencia asociada al modo TM01 que aparece debido al parche acoplado.

### Variación del radio del parche superior

En primer lugar se va a estudiar el efecto del radio del parche acoplado (parámetro  $a_2$ ) sobre la frecuencia. El resto de dimensiones se dejan fijas:  $a=55.83$  mm,  $b=12.42$  mm,  $h=5$  mm,  $h_2=5$  mm,  $feed=26.89$  mm.

En la Figura 2.3.3 se puede observar que la segunda resonancia aparece cuando las dimensiones de los dos parches son diferentes, haciéndose máxima la adaptación cuando el radio del parche acoplado es de 49mm; cuando las dimensiones son iguales la segunda resonancia no aparece, y cuando las dimensiones del parche acoplado son menores que  $1.15 \cdot a$  la segunda resonancia desaparece rápidamente. También se puede comprobar que pese a que los parches tienen dimensiones bastante parecidas, la distancia entre las frecuencias de resonancia es muy grande, del orden de 280 MHz. De esto se puede sacar la conclusión de que el parámetro  $a_2$  no influye de forma importante sobre la distancia existente entre las dos frecuencias, pero si influye de forma importante sobre los niveles de adaptación. De esta variación de parámetros, se puede deducir fácilmente que la dimensión  $a_2$  más apropiada es 49mm porque presenta buen nivel de adaptación en las dos resonancias del modo TM01. Será una dimensión importante en el diseño de la antenna para ajustar fácilmente los niveles de adaptación.

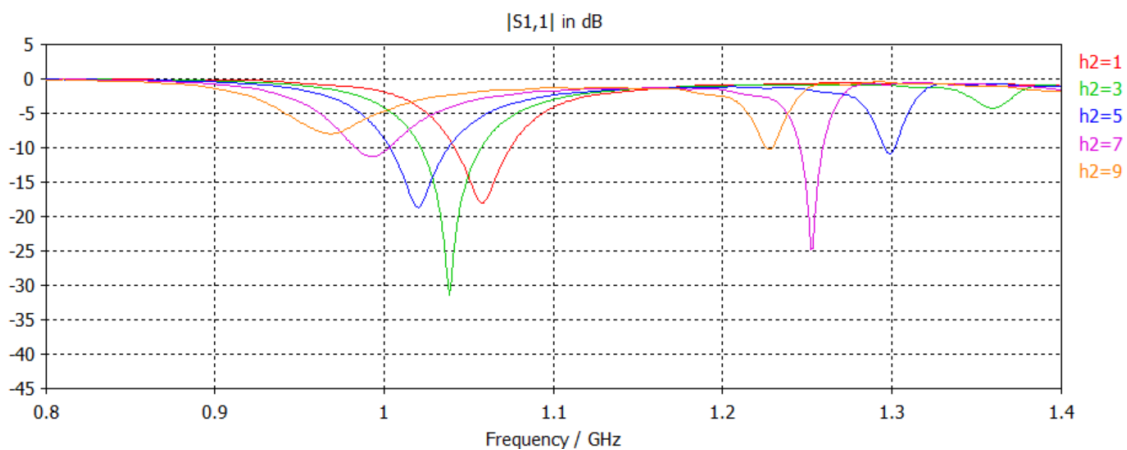


**Figura 2.3.3. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $a_2$  (modo TM01).**

### Variación de separación entre parche inferior y superior

El parámetro  $h_2$  hace referencia a la distancia existente entre el parche alimentado y el parche acoplado. Se dejan fijas las dimensiones:  $a=55.83$  mm,  $a_2=49$  mm,  $b=12.42$  mm,  $h=5$  mm,  $feed=26.89$  mm.

En la Figura 2.3.4 se puede ver la adaptación para varios valores de  $h_2$ . Como se ve en la gráfica, las distancias muy pequeñas y muy grandes no ofrecen buenos niveles de adaptación, en cambio las distancias medias presentan niveles de adaptación aceptables. Se puede sacar la conclusión de que es un parámetro que no influye apenas en la separación que existe entre las dos resonancias del modo TM01 pero sí que puede ser interesante por su influencia sobre el nivel de adaptación. Se escoge  $h_2=6$  mm porque es el punto intermedio entre  $h_2=5$  mm y  $h_2=7$  mm que presentan muy buena adaptación en una resonancia y bastante justa en la otra resonancia.

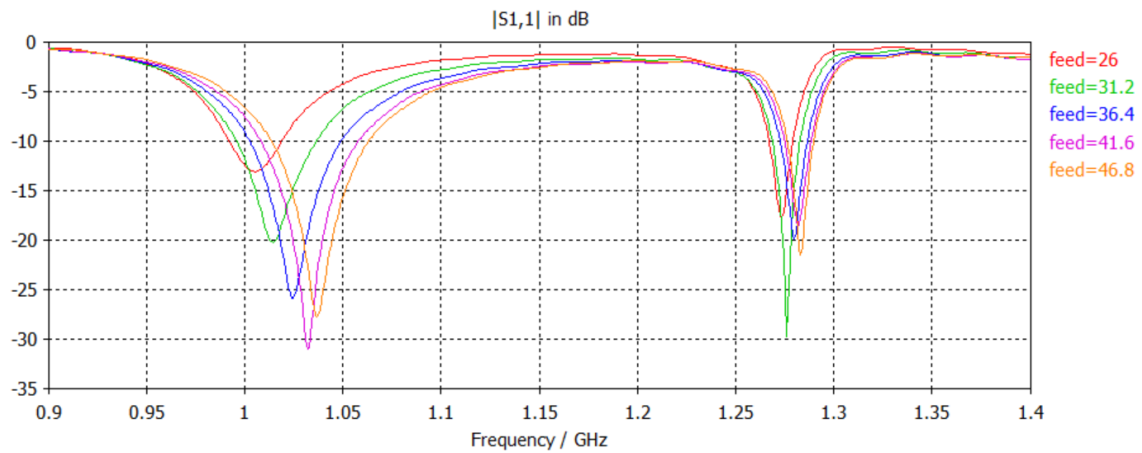


**Figura 2.3.4. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $h_2$  (modo TM01).**

### Variación del punto de alimentación

El parámetro  $feed$  hace referencia a la distancia que hay del punto de alimentación (cable coaxial) al centro del parche. Se dejan fijas las dimensiones:  $a=55.83$  mm,  $a_2=49$  mm,  $b=12.42$  mm,  $h=5$  mm,  $h_2=6$  mm.

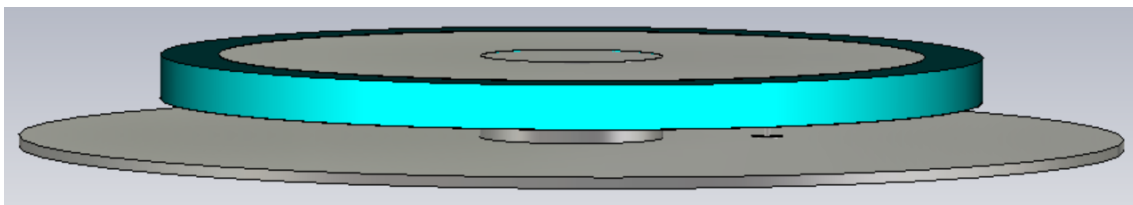
En la Figura 2.3.5 se puede ver la influencia del parámetro  $feed$  sobre la frecuencia de aparición de las resonancias asociadas al modo TM01. La distancia entre frecuencias sigue siendo del orden de 280 MHz para cualquier valor de  $feed$ . Sin embargo, el ancho de banda aumenta ligeramente con una selección adecuada del punto de alimentación.



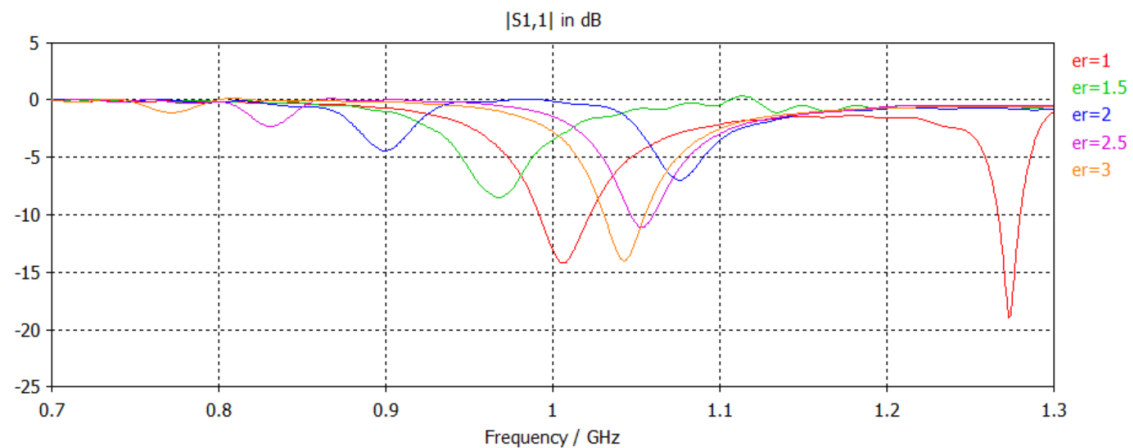
**Figura 2.3.5. Adaptación de la antena para diferentes valores del punto de alimentación (modo TM01).**

### Inclusión de dieléctrico

Como no hemos conseguido el objetivo de juntar las dos resonancias asociadas a los modos TM01 de los parches para que de este modo tengamos una sola resonancia del modo TM01 con ancho de banda elevado, se prueba otra opción para intentar reducir la distancia entre ambas resonancias. En lugar de tener aire entre ambos parches, se introduce dieléctrico entre ambos parches para tratar de reducir la frecuencia superior y juntarla con la inferior; la estructura se puede ver en la Figura 2.3.6. En la Figura 2.3.7 se puede comprobar que no para todos los valores de  $\epsilon_r$  aparecen las dos resonancias, solo aparecen en los casos  $\epsilon_r = 1$  y  $\epsilon_r = 2$ . Si se sigue aumentando  $\epsilon_r$ , como por ejemplo se puede ver en  $\epsilon_r = 3$ , ya no aparecen las dos resonancias. Un dato interesante es que cuando  $\epsilon_r = 2$  la distancia entre resonancias es de 207 MHz frente a la distancia de 270 MHz cuando  $\epsilon_r = 1$ ; aunque la distancia entre resonancias disminuye, sigue siendo demasiado grande como para unir las dos resonancias, además de presentar niveles de adaptación malos. Por tanto, esta opción se descarta.



**Figura 2.3.6. Estructura en tres dimensiones de la antena con dieléctrico.**



**Figura 2.3.7. Adaptación de la antena para diferentes valores de permitividad relativa.**

## Conclusiones

De este análisis se concluye que las resonancias en el modo TM01 no pueden ser juntadas para crear una sola resonancia de banda ancha. Con buenos niveles de adaptación, la relación entre frecuencia superior e inferior se mantiene entre 1.27 y 1.24, algo que permite muy poco margen a la hora de ajustar las frecuencias de diseño de nuestra antena.

### 2.3.3 Análisis de las frecuencias de funcionamiento y de diagrama radiación para el modo TM11

En este apartado se van a estudiar los efectos de varios parámetros sobre las dos frecuencias de resonancia asociadas al modo TM11 de cada uno de los parches. La intención de este estudio es comprobar si las dos frecuencias pueden aparecer lo suficientemente juntas y con nivel suficiente de adaptación como para formar una única resonancia de banda ancha, o bien la posibilidad de tener dos frecuencias separadas y ajustables asociadas al modo TM11 y por ende, diagrama de radiación broadside.

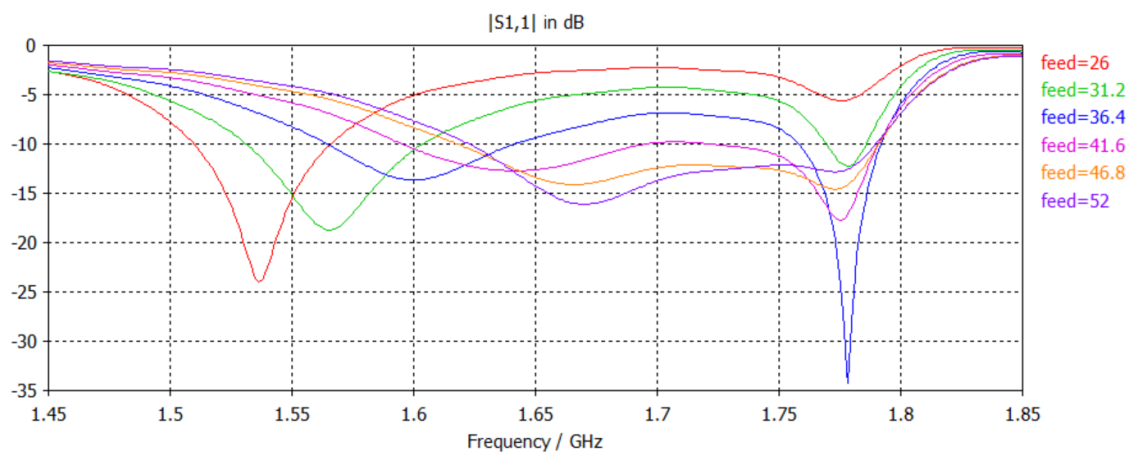
#### Variación del punto de alimentación

En primer lugar se va a variar el parámetro *feed* que es la distancia al centro del parche del punto de alimentación. Se dejan fijas las dimensiones:  $a=55.83$  mm,  $a_2=48.54$  mm,  $b=12.42$  mm,  $h=5$  mm,  $h_2=5$  mm.



Como se puede apreciar en la Figura 2.3.8, el punto de alimentación es muy importante para ajustar la distancia entre frecuencias, y también influye claramente sobre su nivel de adaptación. Como el valor del punto de alimentación está limitado por las dimensiones del propio parche alimentado, esto va a implicar que la relación entre frecuencia superior e inferior se va a encontrar dentro de un límite que está entre 1 y 1.15 aproximadamente. Se puede ver una relación directa en que el aumento del punto de alimentación implica una distancia menor de las frecuencias y un valor del punto de alimentación menor implica una mayor distancia entre resonancias.

Como se puede ver con las dimensiones fijas indicadas y el valor  $feed=46.8$  mm, ya se ha conseguido juntar las dos resonancias y crear una única resonancia de banda ancha. Para seguir explorando otro tipo de posibilidades en los siguientes apartados, se va a optar por escoger un valor del parámetro  $feed$  que mantiene las resonancias separadas para crear antenas multifrecuencia.

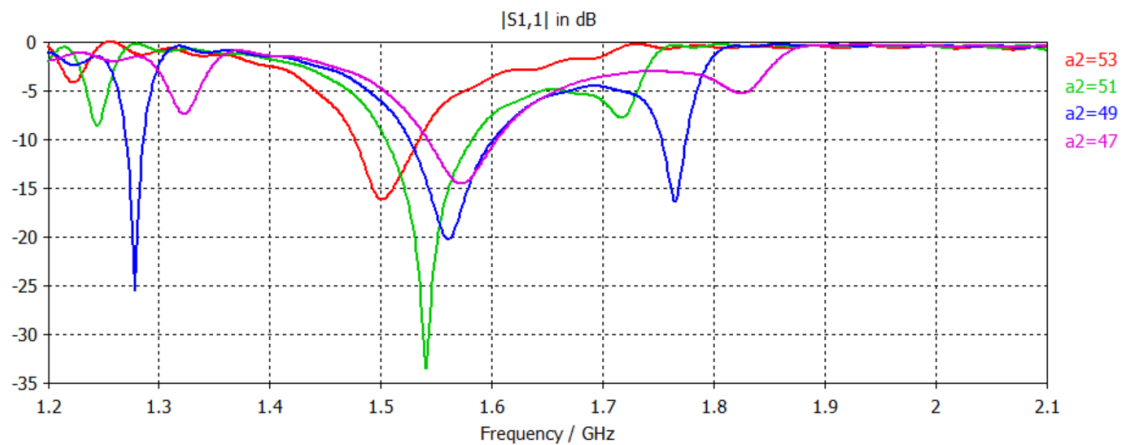


**Figura 2.3.8. Adaptación de la antena para diferentes valores del punto de alimentación (modo TM11).**

### Variación del radio del parche superior

En segundo lugar se va a variar el parámetro  $a_2$  que es el radio del parche acoplado. Se dejan fijas las dimensiones:  $a=55.83$  mm,  $b=12.42$  mm,  $h=5$  mm,  $h_2=5$  mm,  $feed=31.2$  mm.

En la Figura 2.3.9 se puede observar la gráfica de adaptación para varios valores de  $a_2$ . Se puede apreciar que la variación del parámetro  $a_2$  influye notablemente en los niveles de adaptación de ambas resonancias, pero no influye de forma importante en la distancia entre ambas resonancias. Este parámetro va a ser muy importante para ajustar la adaptación de ambas resonancias.

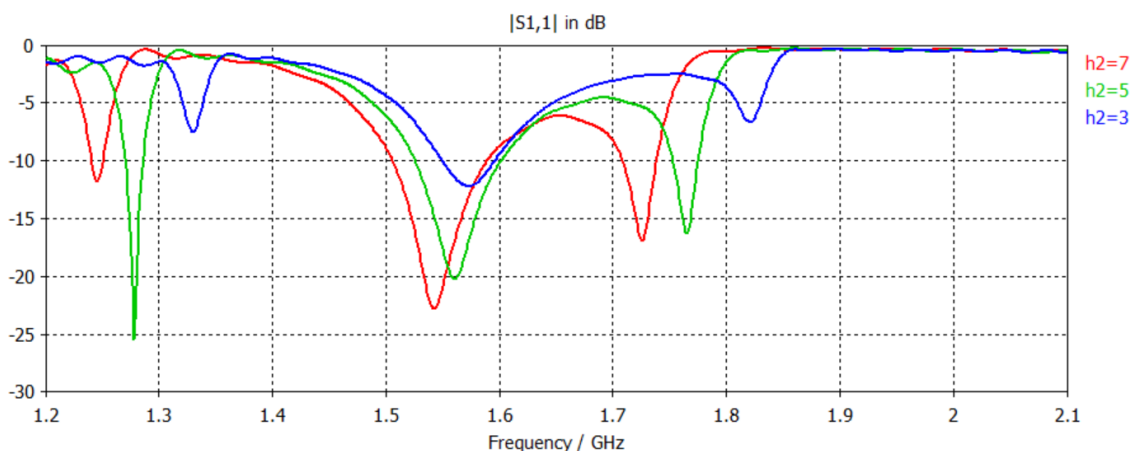


**Figura 2.3.9. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $a_2$  (modo TM11).**

### Variación de la separación entre parche inferior y superior

En tercer lugar se va a variar el parámetro  $h_2$  que es la distancia entre el parche alimentado y el parche acoplado. Se dejan fijas las dimensiones:  $a=55.83$  mm,  $a_2=49$  mm,  $b=12.42$  mm,  $h=5$  mm,  $feed=26.86$  mm.

En la Figura 2.3.10 se observa la gráfica de adaptación para algunos valores de  $h_2$ ; la influencia que tiene sobre los niveles de adaptación es bastante baja en comparación con el parámetro  $a_2$ . En cambio, si influye más en la distancia entre resonancias que el parámetro  $a_2$ , pero sólo se consigue acercar las resonancias cuando el valor de  $h_2$  es grande, lo que provoca que la antena sea más grande en la dirección perpendicular al plano de masa. En conclusión, no es un parámetro interesante por su poca influencia en los niveles de adaptación y el alto coste (en términos dimensionales) que supone utilizarlo para disminuir la distancia entre resonancias.



**Figura 2.3.10. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $h_2$  (modo TM11).**

## Conclusiones

De este análisis se obtienen datos de interés, ya que abarca tanto la posibilidad de diseñar antenas multifrecuencia como la de hacer antenas de banda ancha, todo esto con un simple ajuste de los parámetros necesarios; de todas formas, siempre hay que tener en cuenta la relación máxima de 1.15 existente entre las dos frecuencias. A diferencia del modo TM01, en el modo TM11 sí que se consigue banda ancha juntando las resonancias asociadas a los dos parches.

### 2.3.4 Prototipo de antena de tres frecuencias: dos monopulares y una broadside de banda ancha

Como continuación de los apartados anteriores, se va a proceder a explicar el diseño de un prototipo de antena multifrecuencia; en concreto va a tener dos frecuencias de funcionamiento con diagrama de radiación monopolar asociadas al modo TM01 y una frecuencia de funcionamiento de banda ancha con diagrama de radiación de tipo broadside asociada al modo TM11. La frecuencia más baja asociada al modo TM01 y la frecuencia del modo TM11 son totalmente ajustables mediante los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $h$ , referentes a la Figura 2.3.1. La frecuencia superior asociada al modo TM01 es aproximadamente 1.25 veces la frecuencia inferior asociada al modo TM01; esto es un inconveniente, puesto que no hay prácticamente margen para el ajuste.

El proceso de diseño de esta antena es el siguiente:

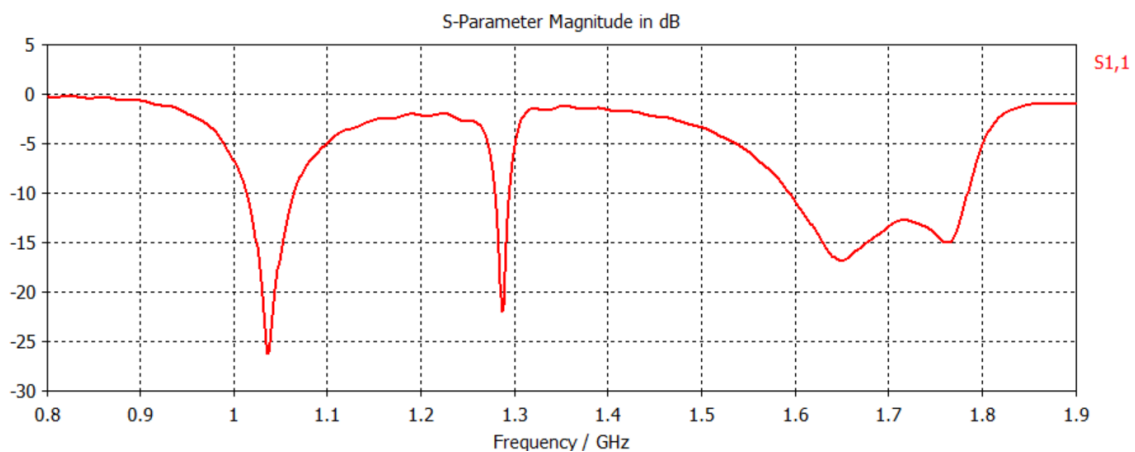
- Elección de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $h$  una vez conocidas las frecuencias en las que se desea la frecuencia inferior del modo TM01 y la frecuencia del modo TM11. Se pueden ver más detalles en [15].
- Escoger un valor adecuado del punto de alimentación que permita juntar las dos frecuencias asociadas al modo TM11 para crear una sola frecuencia de resonancia de mayor ancho de banda; cuanto mayor es el valor del punto de alimentación, hay menor distancia entre estas resonancias. Hay que ajustar de forma que se consiga el mayor ancho de banda posible sin tener mal nivel de adaptación en el centro de la banda, como se ha visto en el apartado 2.3.3.
- Ajustar los valores de  $a_2$  y  $h_2$  para tener buen nivel de adaptación en todas las frecuencias; por lo general, es bastante más influyente  $a_2$  que  $h_2$ .

Las dimensiones del prototipo propuesto en este apartado, de acuerdo a la Figura 2.3.1, son:  $a=55.83$  mm,  $a_2=48$  mm,  $b=12.42$  mm,  $h=5$  mm,  $h_2=6$  mm,  $feed=44$  mm.

En la Figura 2.3.11 se puede ver la gráfica de adaptación de la antena. Como se observa, existen 3 frecuencias de adaptación:

- Frecuencia del parche mayor en el modo TM01: frecuencia central de 1039 MHz, ancho de banda de 50.8 MHz (4.88%).
- Frecuencia del parche menor en el modo TM01: frecuencia central de 1287 MHz, ancho de banda de 14.7 MHz (1.14%).
- Frecuencia del modo TM11 asociado a los modos TM11 de cada parche: frecuencia central de 1689 MHz, ancho de banda de 190.5 MHz (11.27%).

El ancho de banda de la resonancia del parche mayor en el modo TM01 es aceptable para ser un parche porque se consigue casi el 5%; sin embargo, el ancho de banda de la resonancia del parche menor en el modo TM01 es muy bajo, ya que el 1% es muy bajo incluso para antenas de parche que por lo menos suelen llegar al 3%. Se puede comprobar que la relación entre la frecuencia de aparición de ambas resonancias asociadas al modo TM01 es de 1.24. De todas formas, no se consigue el suficiente ancho de banda como para cubrir la banda de interés. El ancho de banda del modo TM11 es bastante alto para ser una antena de parche, porque llega al 11% frente al 3-4% habitual de este tipo de antenas; esto es debido a que se juntan dos resonancias.



**Figura 2.3.11. Coeficiente de reflexión de la antena 2.3.4.**

El diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM0 (Figura 2.3.12) es bastante parecido al monopolar, teniendo el máximo de radiación en la dirección en la que se encuentra la alimentación; no tiene el nulo de radiación exactamente en  $\theta = 0^\circ$  sino en  $\theta = -9^\circ$  como se puede ver en el corte con el plano XZ (Figura 2.3.13). En el corte con el plano XY de la Figura 2.3.14 se puede comprobar que la diferencia entre el punto de máxima ganancia y el de mínima ganancia es de 0.63 dB, un valor bastante bajo.

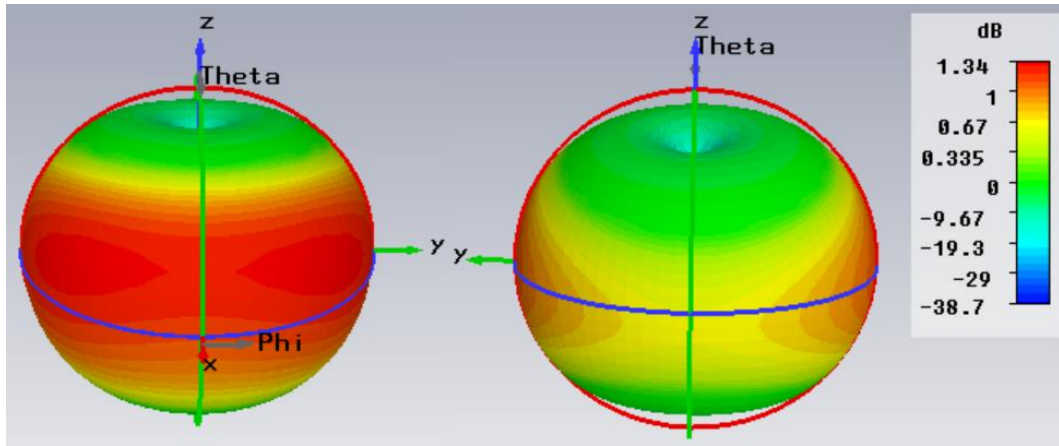


Figura 2.3.12. Diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM01.

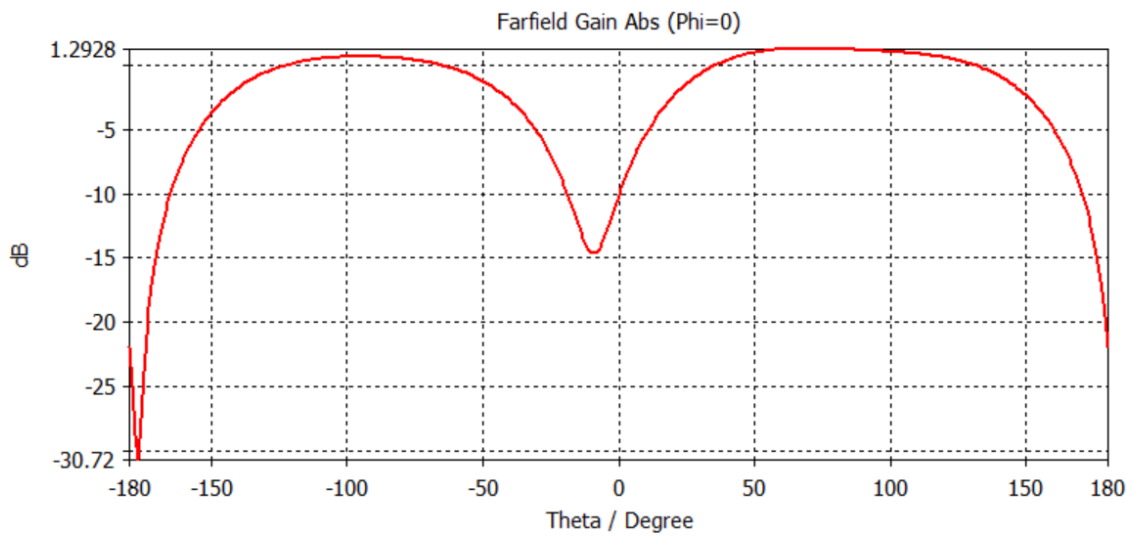


Figura 2.3.13. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM01.

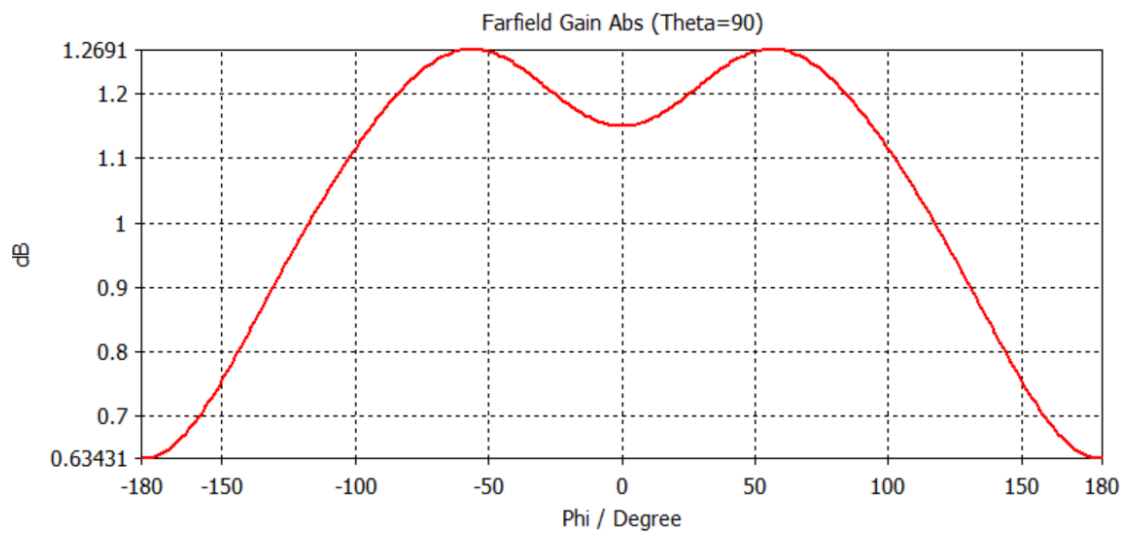


Figura 2.3.14. Diagrama de radiación en el plano XY de la frecuencia inferior del modo TM01.

En la frecuencia superior del modo TM01 el diagrama de radiación (Figura 2.3.15) no es parecido al monopolar (que es el objetivo), por tanto es un problema. El nulo de radiación que debería estar en  $\theta = 0^\circ$  está desplazado a  $\theta = 28^\circ$ , y la ganancia es grande para un diagrama de radiación tipo monopolar (casi 4 dB) en la dirección contraria a donde se sitúa la alimentación; esto se puede ver bien en el corte con el plano XZ de la Figura 2.3.16. El campo eléctrico en dirección z en la antena (Figura 2.3.17) tiene una distribución bastante diferente al campo eléctrico del modo TM01, y como consecuencia se produce el deterioro en el diagrama de radiación.

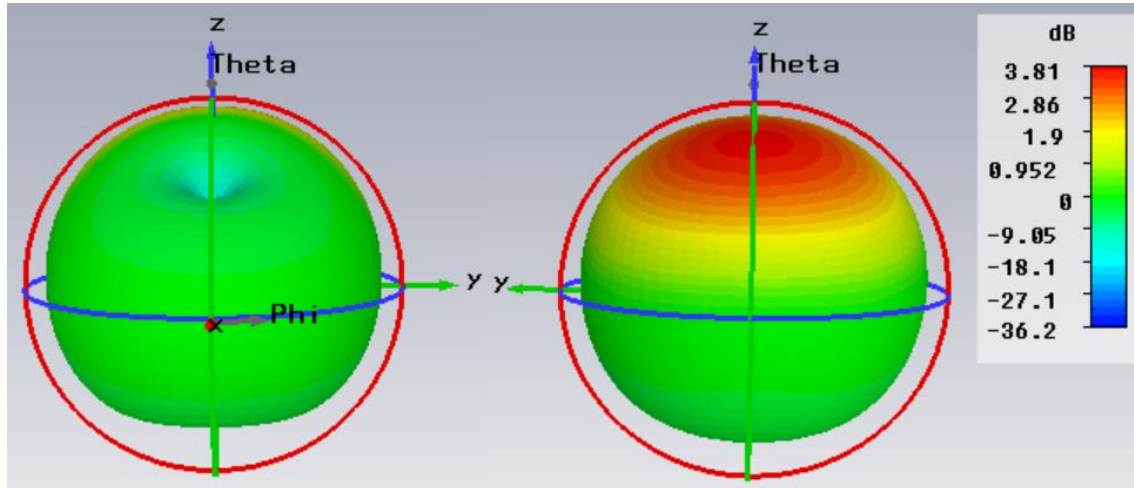


Figura 2.3.15. Diagrama de radiación de la frecuencia superior del modo TM01.

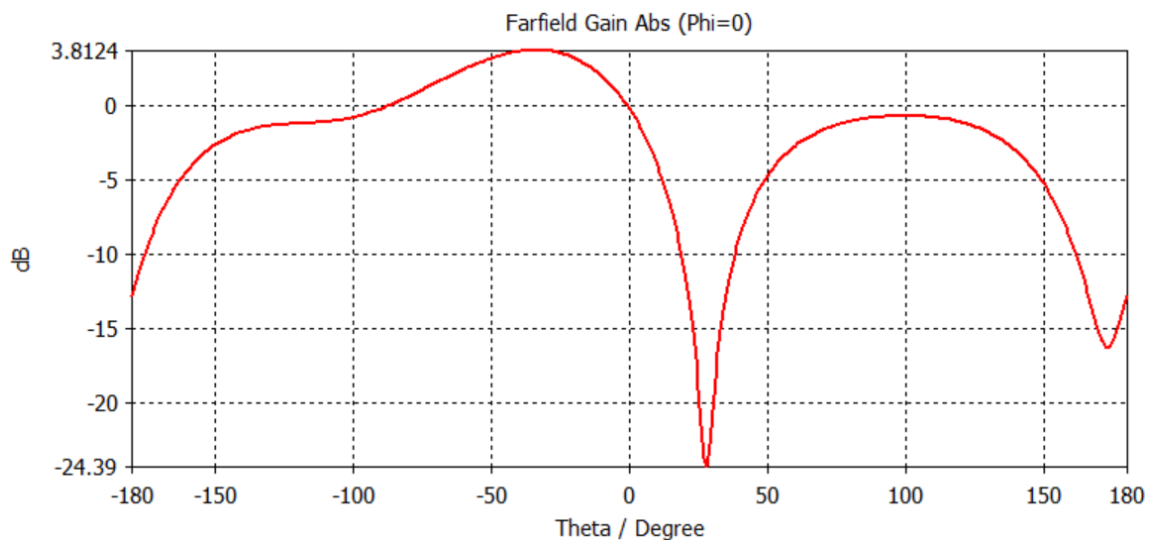


Figura 2.3.16. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia superior del modo TM01.

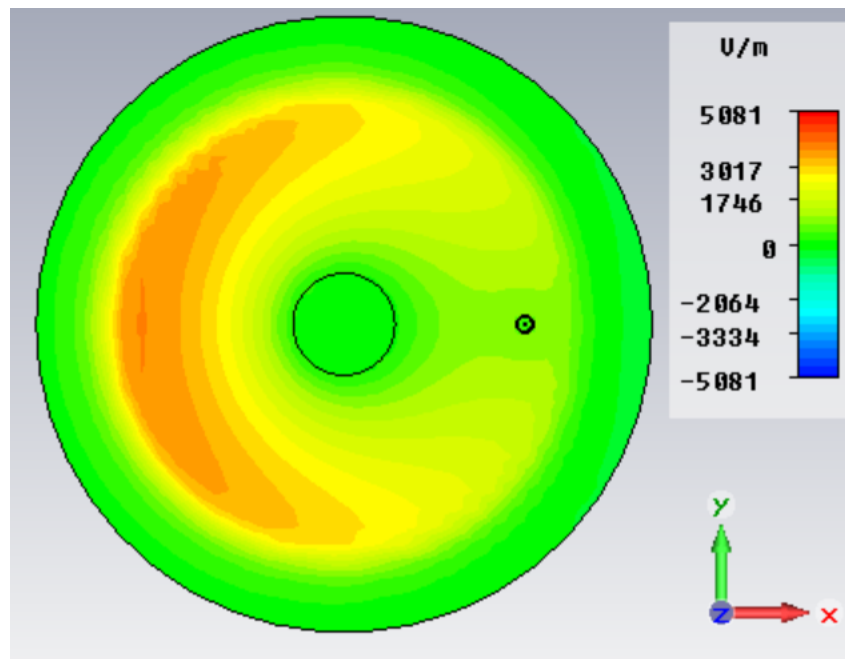


Figura 2.3.17. Campo eléctrico en dirección z de la frecuencia superior del modo TM01.

El diagrama de radiación en el rango de frecuencias de adaptación correspondiente al modo TM11 (Figuras 2.3.18 y 2.3.19) se mantiene muy estable, y muy parecido al broadside esperado. La diferencia de ganancia entre la frecuencia inferior y la superior de la banda adaptada es de 0.12 dB, como se puede observar en los cortes con el plano XZ (Figuras 2.3.20 y 2.3.21).

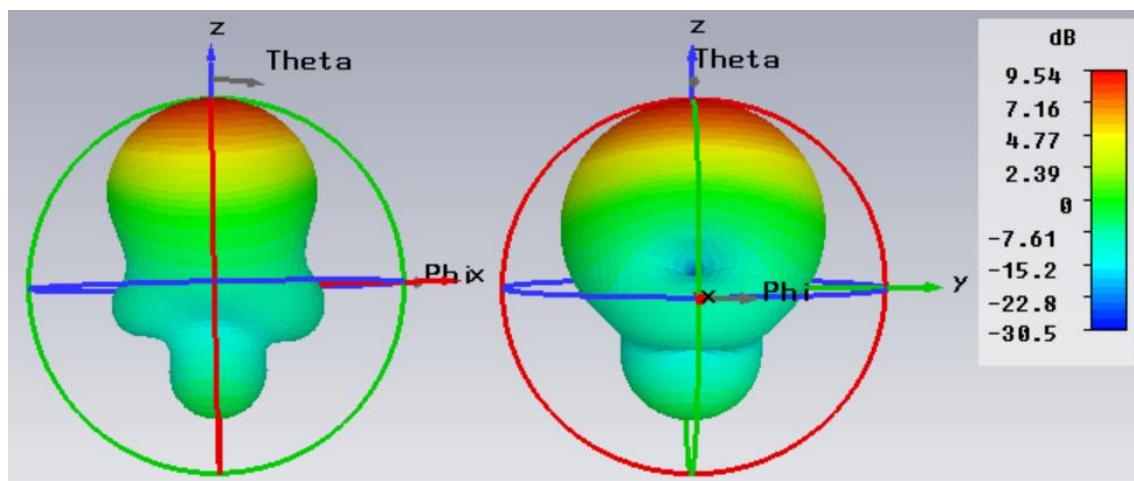


Figura 2.3.18. Diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM11.

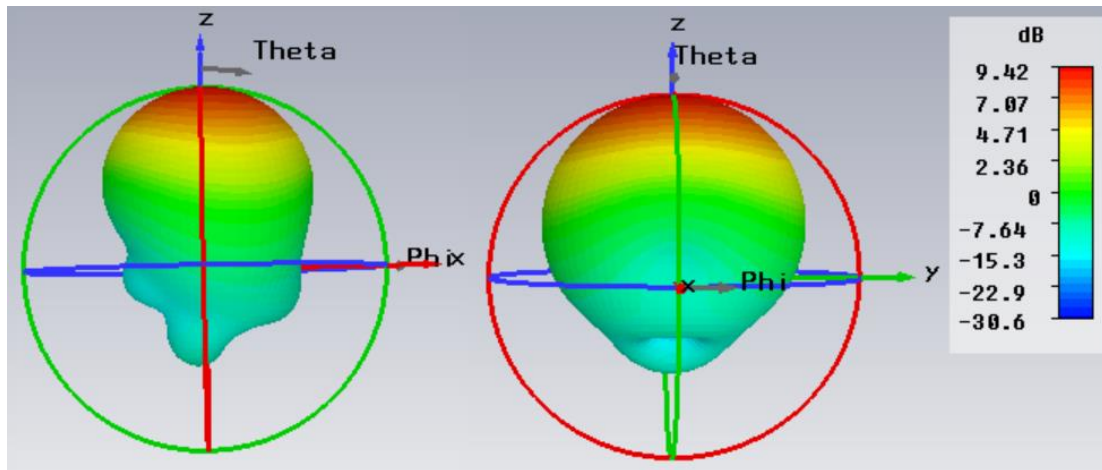


Figura 2.3.19. Diagrama de radiación de la frecuencia superior del modo TM11.

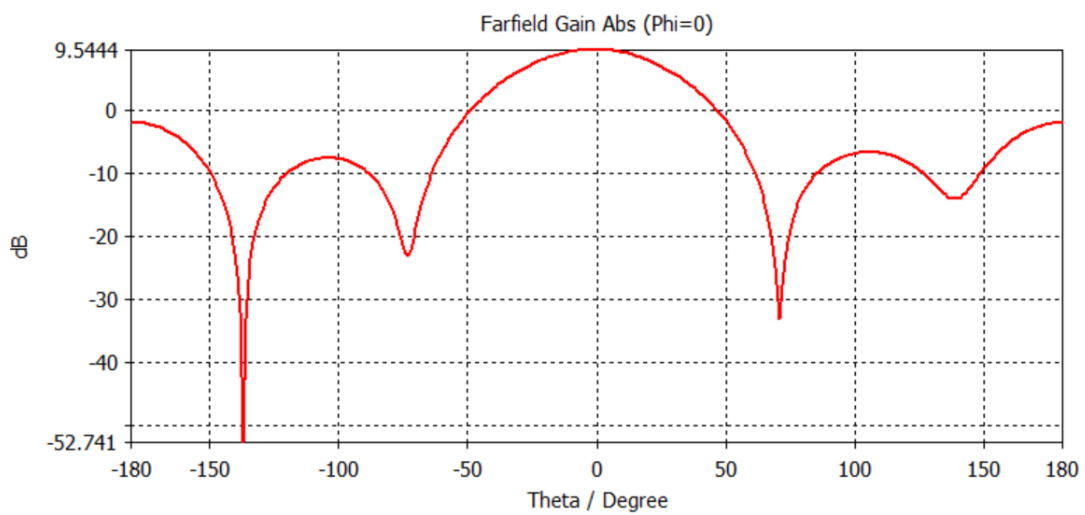


Figura 2.3.20. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM11.

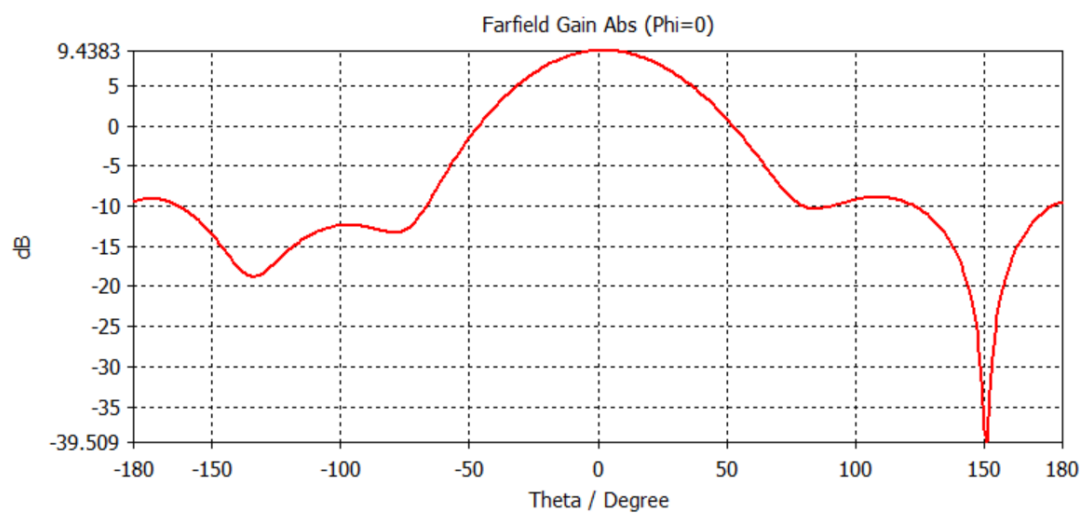


Figura 2.3.21. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia superior del modo TM11.



En resumen, esta antena es una buena opción cuando se necesite un diagrama de radiación de tipo broadside de banda ancha y un diagrama de radiación tipo monopolar a una frecuencia inferior; la principal ventaja es que las frecuencias son ajustables, y además siempre queda la posibilidad de utilizar la segunda frecuencia para otra necesidad aunque hay que tener presente su degradado diagrama de radiación y su escaso ancho de banda.

### 2.3.5 Prototipo de antena de cuatro frecuencias: dos monopulares y dos broadside

En este apartado se va a proceder a explicar un prototipo de antena basada en las explicaciones realizadas en los apartados anteriores. La presente antena va a tener cuatro frecuencias de funcionamiento, dos con diagrama de radiación tipo monopolar asociadas al modo TM01 de cada parche y dos con diagrama de radiación broadside asociadas al modo TM11 de cada parche. La frecuencia inferior asociada al modo TM01 y la frecuencia inferior asociada al modo TM11 pueden ser totalmente ajustadas mediante los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $h$ . La frecuencia superior asociada al modo TM01 no tiene margen de ajuste, pues es aproximadamente 1.25 veces la frecuencia inferior asociada al modo TM0. La frecuencia superior asociada al modo TM11 puede ser ajustada dentro de un margen, ya que como mucho puede ser 1.15 veces la frecuencia inferior asociada al modo TM11.

El proceso de diseño de esta antena es el siguiente:

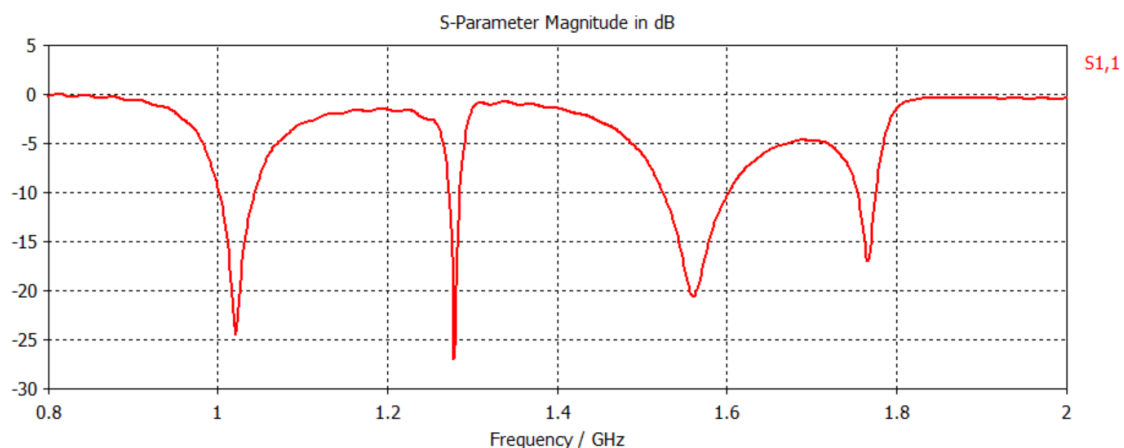
- Elección de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $h$  una vez conocidas las frecuencias en las que se desea la frecuencia inferior del modo TM01 y la frecuencia inferior asociada al modo TM11. Se pueden ver más detalles en [14].
- Escoger un valor adecuado del punto de alimentación que permita mantener la relación entre las frecuencias inferior y superior asociadas al modo TM11. Cuanto mayor es el valor del parámetro  $feed$ , menor distancia existe entre las frecuencias.
- Ajustar los valores de  $a_2$  y  $h_2$  para tener buen nivel de adaptación en todas las frecuencias; por lo general, es bastante más influyente  $a_2$  que  $h_2$ .

Las dimensiones del prototipo propuesto en este apartado, de acuerdo a la Figura 2.3.1, son:  $a=55.83$  mm,  $a_2=49$  mm,  $b=12.42$  mm,  $h=5$  mm,  $h_2=5$  mm,  $feed=31.2$  mm.

En la Figura 2.3.22 se puede ver la gráfica de adaptación de la antenna. Como se observa, existen 4 frecuencias de adaptación:

- Frecuencia del parche mayor en el modo TM01: frecuencia central de 1023 MHz, ancho de banda de 42.3 MHz (4.13%).
- Frecuencia del parche menor en el modo TM01: frecuencia central de 1279 MHz, ancho de banda de 12.6 MHz (0.98%).
- Frecuencia del parche mayor en el modo TM11: frecuencia central de 1563 MHz, ancho de banda de 78 MHz (4.98%).
- Frecuencia del parche menor en el modo TM11: frecuencia central de 1765 MHz, ancho de banda de 21.7 MHz (1.23%).

El ancho de banda en las frecuencias del modo TM01 (con diagrama de radiación monopolar) es del 1% y el 4% aproximadamente, que es insuficiente para cubrir la banda de interés. La relación que existe entre las frecuencias de los modos TM01 es de 1.25, algo que se esperaba pues se ha demostrado la imposibilidad de ajustar la frecuencia de aparición de las resonancias. La relación existente entre las frecuencias asociadas a los modos TM11 es de 1.13, cerca del límite de 1.15 en el cual es muy complicado adaptar todas las resonancias.



**Figura 2.3.22. Coeficiente de reflexión de la antena 2.3.5.**

El diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM01 (Figura 2.3.23) tiene mucho parecido con el monopolar aunque presenta algunas variaciones como por ejemplo tener el máximo de radiación en la dirección donde se encuentra el punto de alimentación (hay que destacar que los resultados son simulaciones; si se mide la antena construida no suele existir una variación tan importante), o que en lugar de tener el nulo de radiación en  $\theta = 0^\circ$  lo tiene en  $\theta = -6.5^\circ$  como se puede ver en el corte con el plano XZ (Figura 2.3.24). En el plano XY (Figura 2.3.25) se puede comprobar que la diferencia entre ganancia máxima y ganancia mínima es de 0.5 dB, un valor muy bajo.

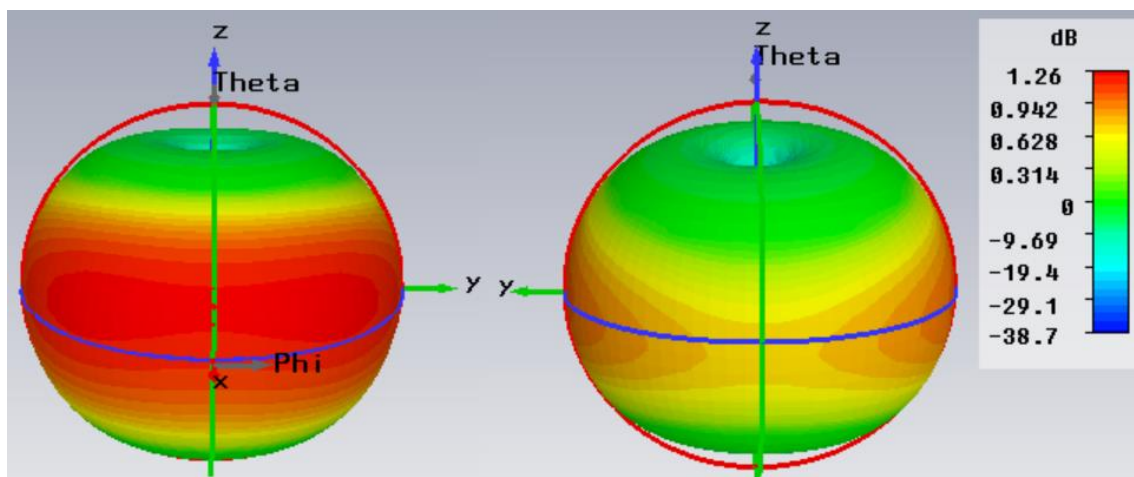


Figura 2.3.23. Diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM01.

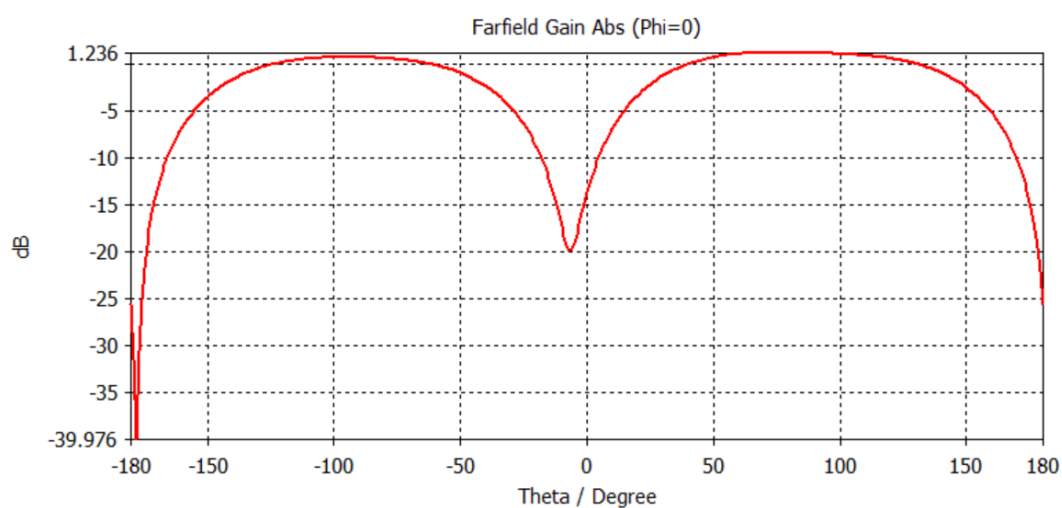


Figura 2.3.24. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM01.

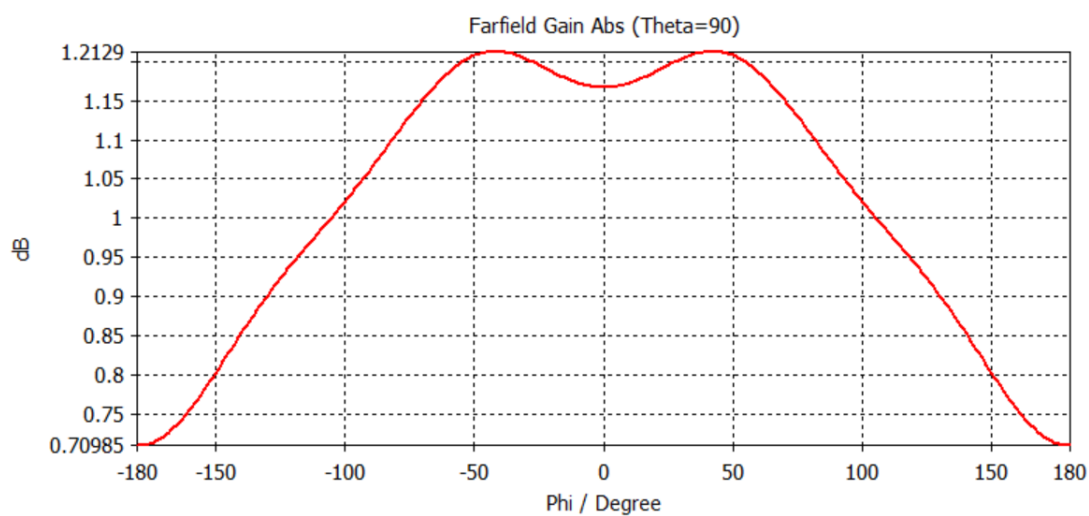


Figura 2.3.25. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM01.

El diagrama de radiación de la frecuencia del modo TM01 asociada al parche menor (Figura 2.3.26) tiene diferencias importantes respecto al monopolar. Las más importantes son que el nulo de radiación ya no se encuentra en  $\theta = 0^\circ$  sino en  $\theta = 18.5^\circ$  y que la ganancia es elevada para un diagrama tipo monopolar (2.6 dB) en la dirección contraria a donde se encuentra el punto de alimentación; ambas apreciaciones se pueden ver en el corte con el plano XZ (Figura 2.3.27). El deterioro del diagrama de radiación es consecuencia de la distribución de campo eléctrico (Figura 2.3.28), donde se puede comprobar que el campo es bastante diferente al campo teórico del modo TM01. Además es destacable que la eficiencia de la antenna en esta frecuencia es del 89% frente al 98% del resto de frecuencias.

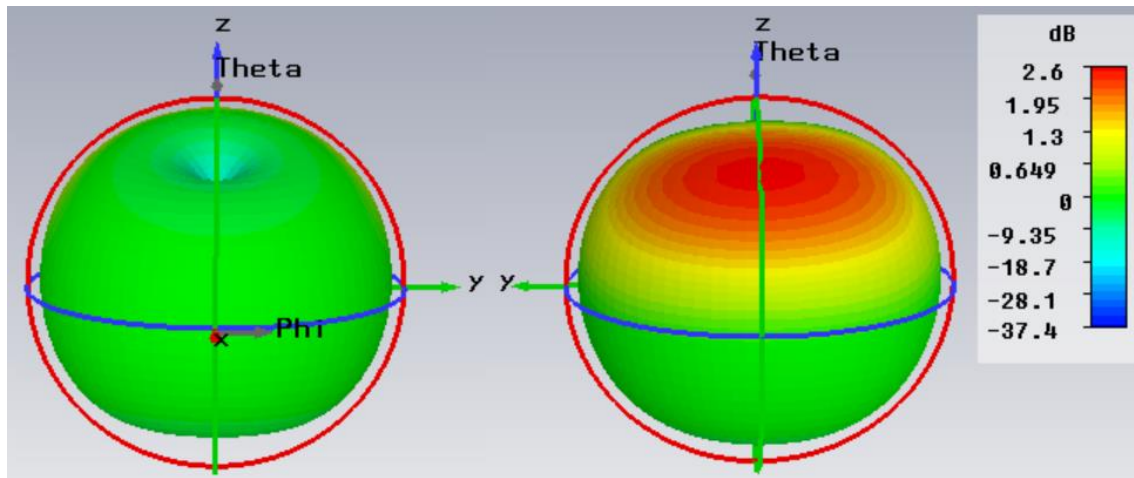


Figura 2.3.26. Diagrama de radiación de la frecuencia superior del modo TM01.

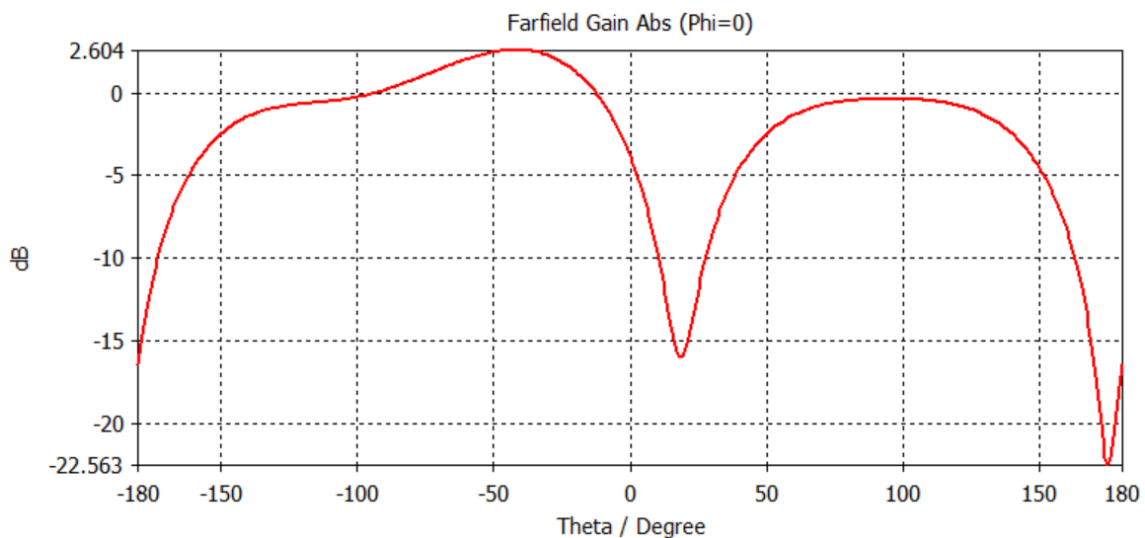


Figura 2.3.27. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia superior del modo TM01.

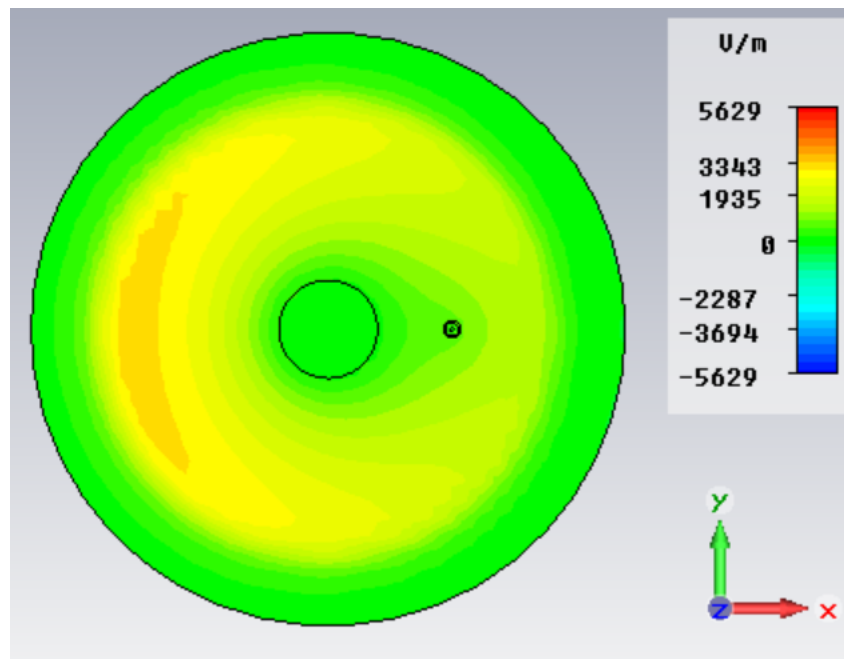


Figura 2.3.28. Campo eléctrico en dirección z de la frecuencia superior del modo TM01.

El diagrama de radiación en la frecuencia del modo TM11 asociada al parche mayor (Figura 2.3.29) es muy parecido al que cabría esperar pues es de tipo broadside con un valor de ganancia típico de los parches. En el corte con el plano XZ (Figura 2.3.30) se puede observar que el ancho de haz a -3dB es de 55° y la ganancia de 9.54 dB.

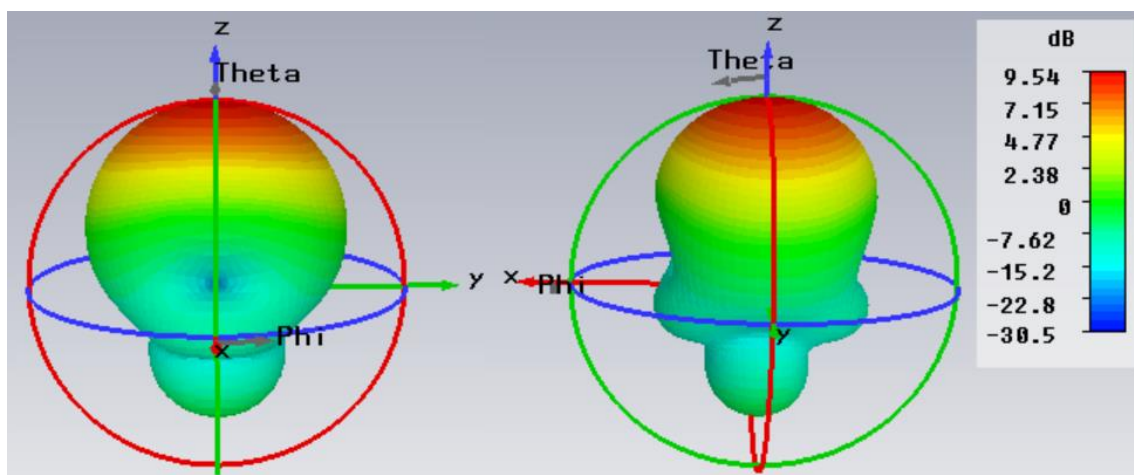
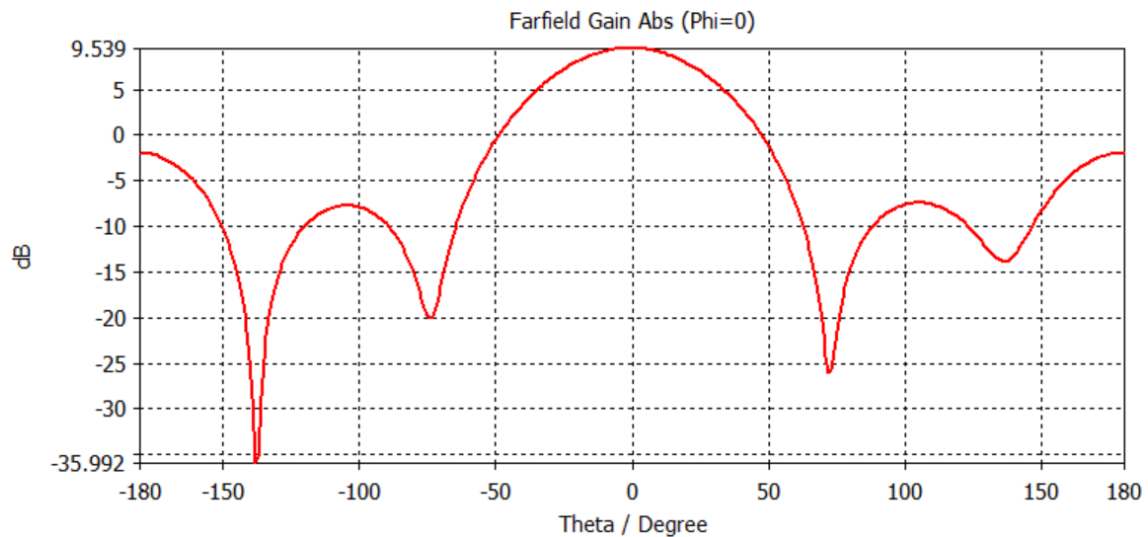
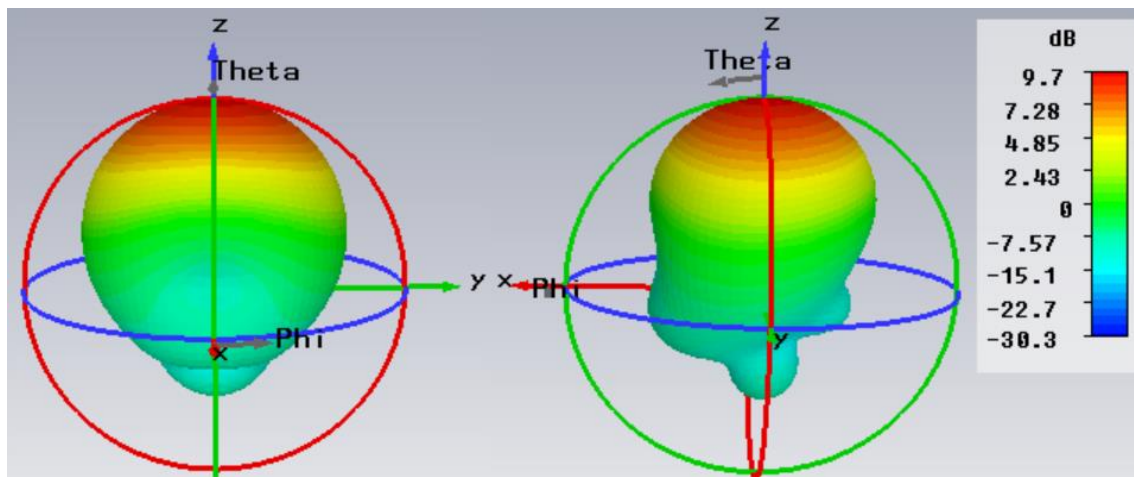


Figura 2.3.29. Diagrama de radiación de la frecuencia inferior del modo TM11.

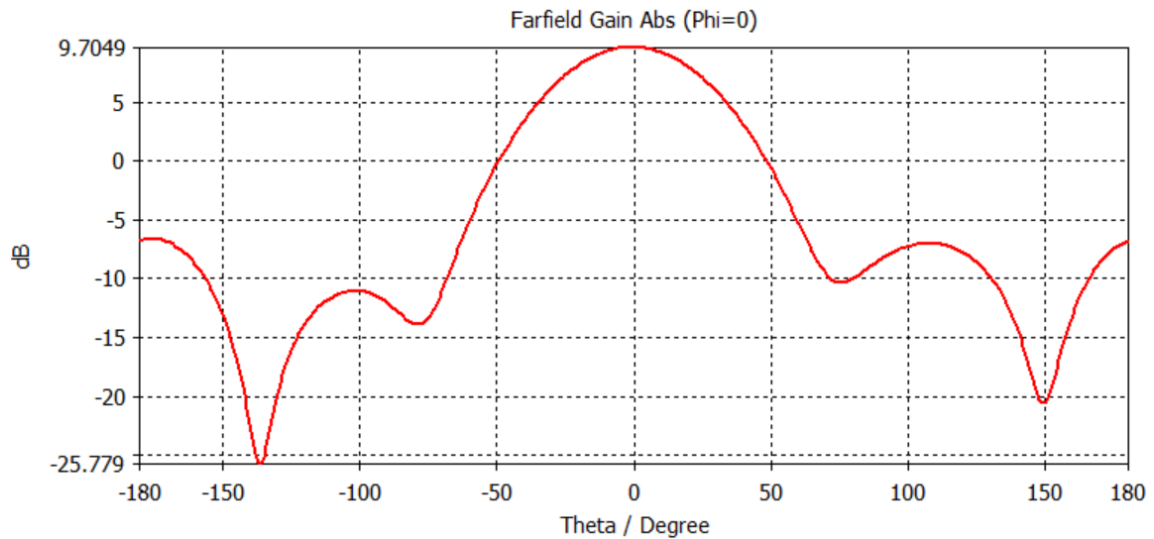


**Figura 2.3.30. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia inferior del modo TM11.**

El diagrama de radiación en la frecuencia del modo TM11 asociada al parche menor (Figura 2.3.31) también es muy parecido al que cabría esperar pues es de tipo broadside con un valor de ganancia típico de los parches. En el corte con el plano XZ (Figura 2.3.32) se puede observar que el ancho de haz a -3dB es de 54° y la ganancia de 9.7 dB.



**Figura 2.3.31. Diagrama de radiación de la frecuencia superior del modo TM11.**



**Figura 2.3.32. Diagrama de radiación en el plano XZ de la frecuencia superior del modo TM11.**

En resumen, esta antena puede ser utilizada como una antena multifrecuencia; se pueden conseguir dos frecuencias de resonancia ajustables, una con diagrama de radiación monopolar y otra con diagrama de radiación broadside. Además, aparece una frecuencia adicional con un diagrama de radiación de tipo monopolar deteriorado que mantiene una relación fija con la otra resonancia monopolar; también aparece otra frecuencia de resonancia con diagrama de radiación broadside.

### 3. Diseño de antenas de parche con diagrama de radiación monopolar y banda ancha

#### 3.1 Parche cuadrado con paredes de cortocircuito

##### 3.1.1 Estructura, dimensiones de la antena y funcionamiento

La antena estudiada en esta sección consiste en un parche cuadrado con paredes de cortocircuito en dos de sus lados. La alimentación se realiza alimentando con un coaxial un disco situado debajo del parche cuadrado, y por acoplo magnético se transmite energía al parche. La estructura de la antena, así como sus dimensiones están indicadas en la Figura 3.1.1.

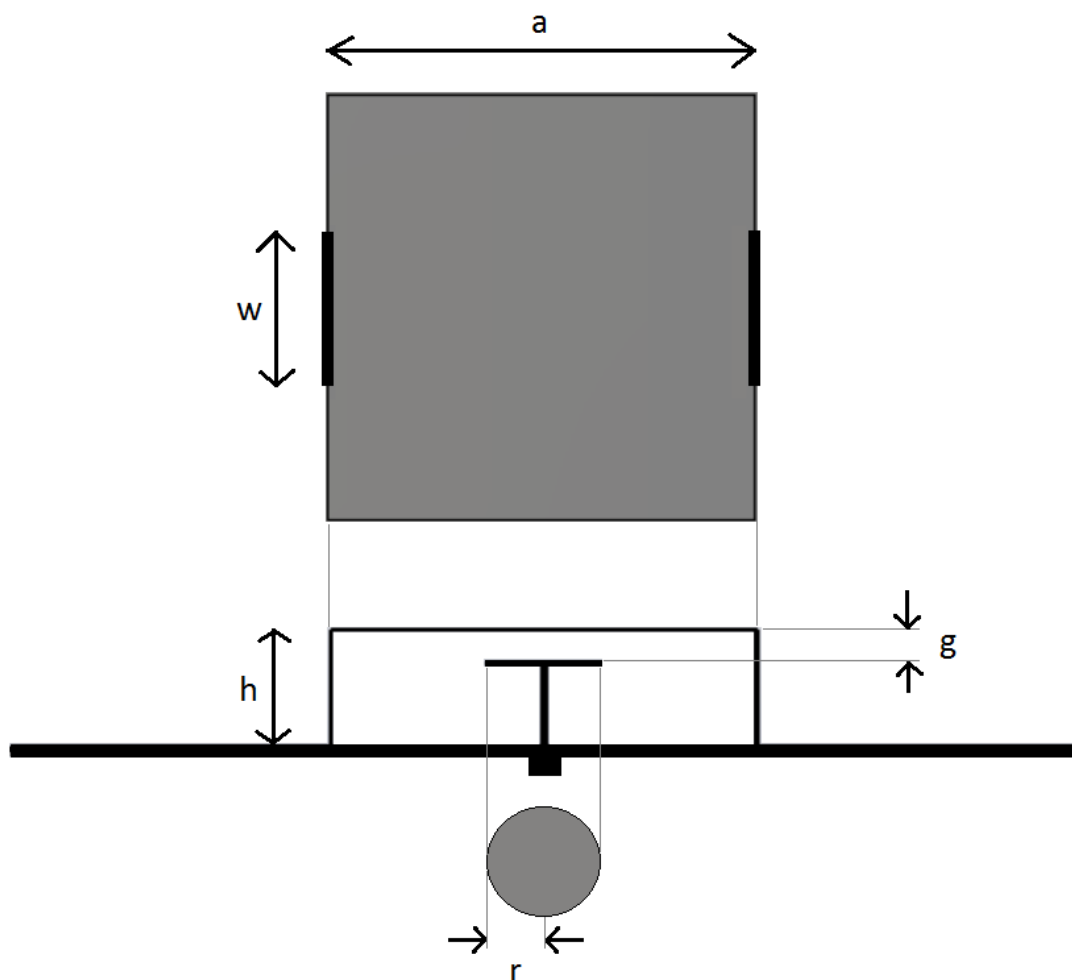
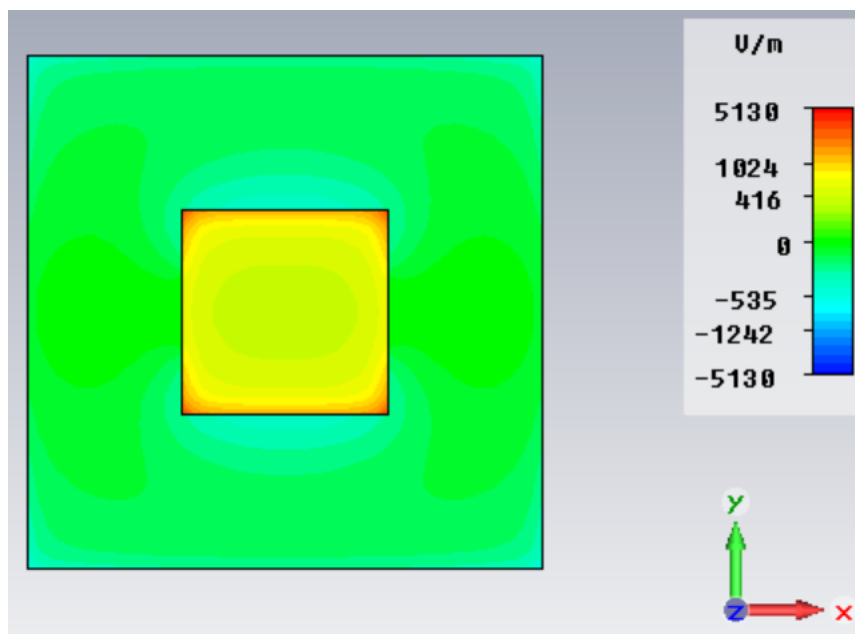


Figura 3.1.1. Esquema de la estructura de la antena 3.1. Vista de perfil y de planta.



En esta antena, el principio de funcionamiento es muy simple. Lo primero que hay que destacar es que debido a la existencia de paredes de cortocircuito, el campo eléctrico en dirección  $z$ , que es la componente principal en las antenas de parche (Figura 3.1.2), se ve forzado a ser nulo en los puntos cortocircuitados porque cumple la condición de contorno de conductor perfecto de las ecuaciones de Maxwell,  $\vec{E} \times \hat{n} = 0$ . De este modo, el campo eléctrico en los bordes que tienen paredes cortocircuitadas es nulo en los puntos cortocircuitados, aumentando rápidamente cuando la distancia a los puntos cortocircuitados aumenta. El campo eléctrico que aparece en las paredes que no están cortocircuitadas se mantiene constante si se varía la coordenada  $X$  ó  $Y$  (dependiendo de cómo se sitúe el parche), y uniforme en ambos bordes; de esta forma se puede explicar la radiación fácilmente, ya que se crean en las paredes dos corrientes magnéticas de igual magnitud y en contrafase, lo que da lugar a un diagrama de radiación de tipo monopolar (Figura 3.1.3) con nulos de radiación en  $\theta = 0^\circ$  y  $\theta = 180^\circ$  aproximadamente; evidentemente, la distribución de campo no es ideal, por lo que el diagrama de radiación no es monopolar puro pero sí bastante aceptable, aunque presenta algunos problemas: tiene elevados niveles de ganancia en las direcciones de los bordes donde no hay pared de cortocircuito (corte con el plano  $YZ$  de la Figura 2.4.3) y en el corte con el plano  $XY$  (Figura 3.1.4) se puede ver que la ganancia varía considerablemente (casi 3 dB) con la variación de  $\phi$ .



**Figura 3.1.2. Campo eléctrico en dirección  $z$  de la antena 3.1.**

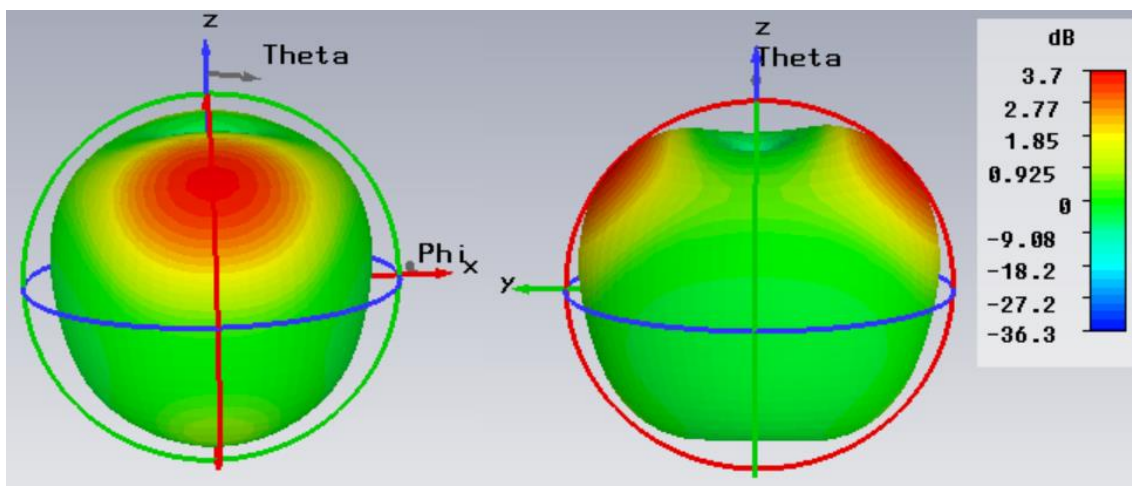


Figura 3.1.3. Diagrama de radiación de la antena 3.1.

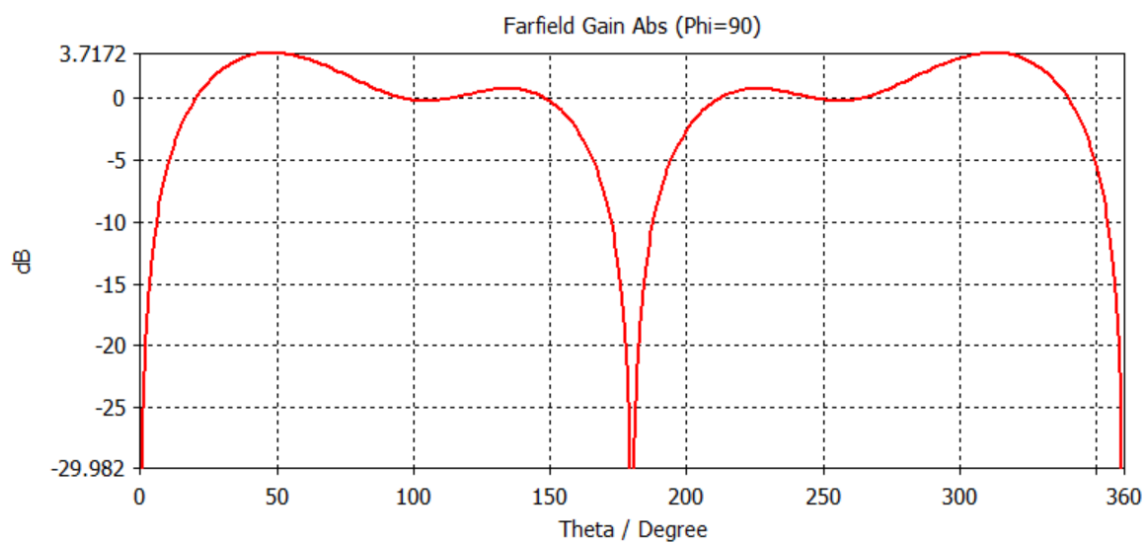


Figura 3.1.4. Diagrama de radiación en el plano ZY de la antena 3.1.

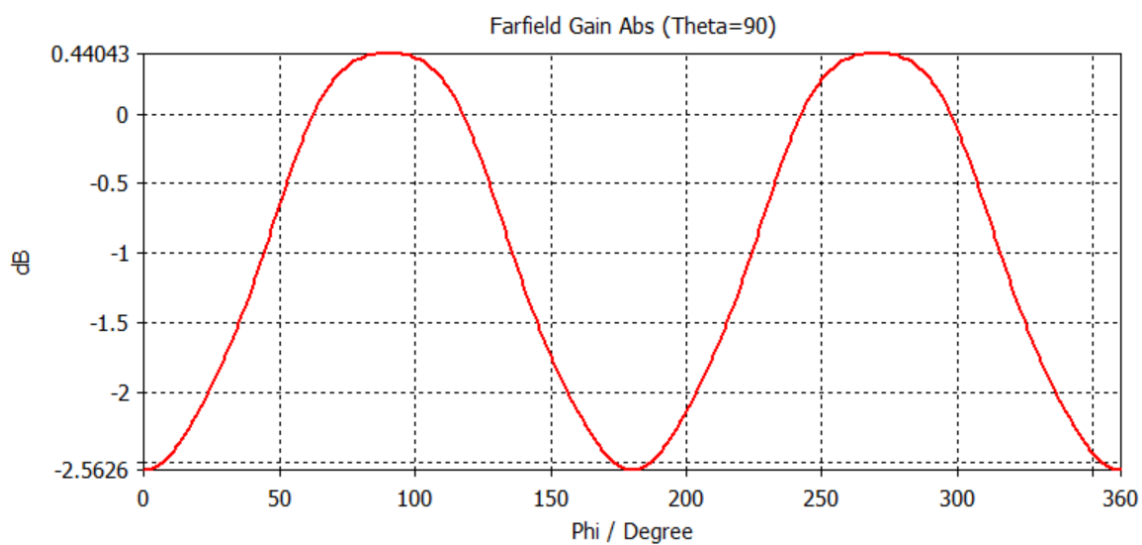


Figura 3.1.5. Diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.

### 3.1.2 Estudio paramétrico

En este apartado se va a hacer un estudio de los efectos de la variación de los parámetros sobre la antena, como la frecuencia de funcionamiento, el nivel de adaptación o el ancho de banda.

#### Variación del ancho del parche

El parámetro  $a$  hace referencia a la longitud del lado del parche cuadrado. Este parámetro influye fundamentalmente en la frecuencia de funcionamiento del parche; aproximadamente,  $a = 0.28 \cdot \lambda$ .

Se fijan las siguientes dimensiones:  $g=7$  mm,  $h=24.2$  mm,  $r=12$  mm,  $w=31$  mm. En la Figura 3.1.6 se puede ver el efecto de variar el parámetro  $a$  sobre la frecuencia de resonancia. Como se ha explicado anteriormente, cambia considerablemente la frecuencia central de la banda de funcionamiento, y también influye en el nivel de adaptación y el ancho de banda.

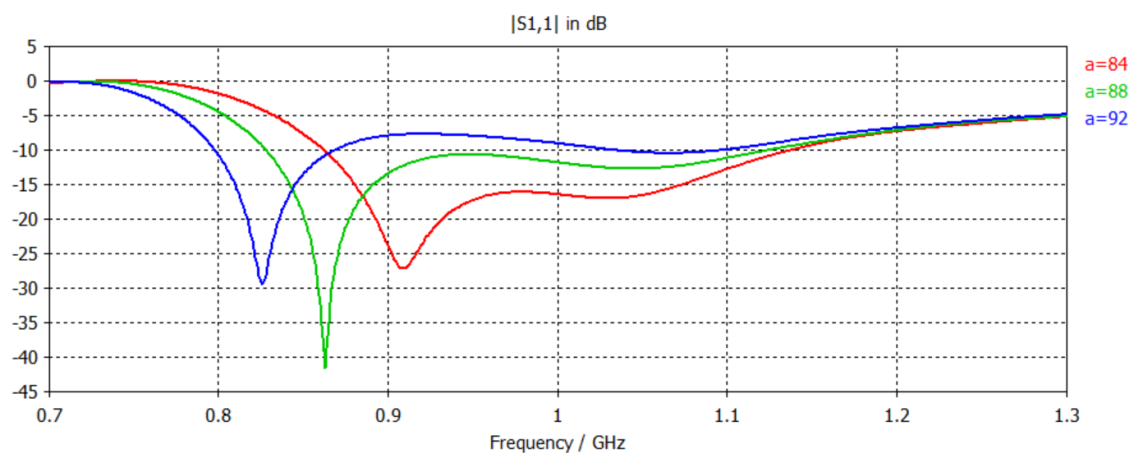
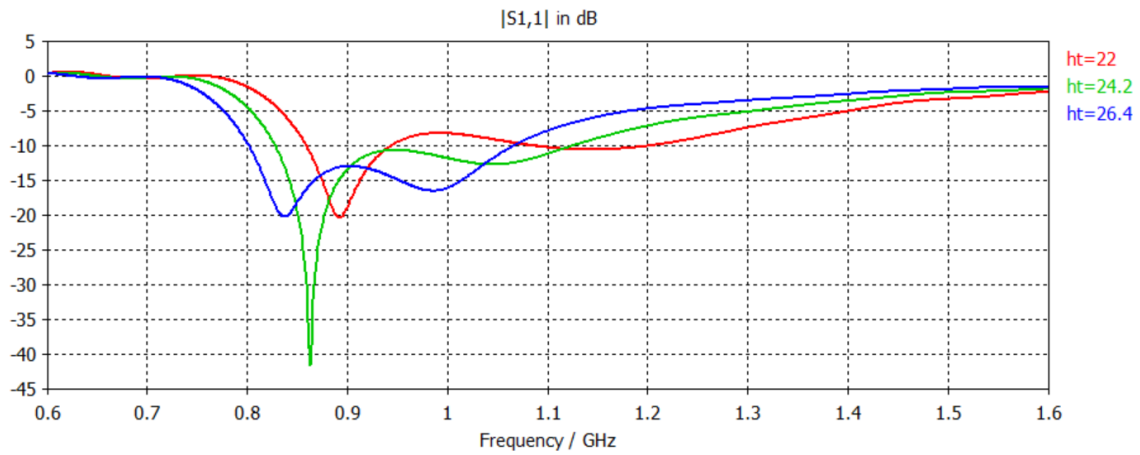


Figura 3.1.6 Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $a$ .

#### Variación de la altura del parche

El parámetro  $h$  hace referencia a la separación que existe entre el plano de masa y el parche cuadrado.

Se fijan las siguientes dimensiones:  $a=88$  mm,  $g=7$  mm,  $r=12$  mm,  $w=31$  mm. En la Figura 3.1.7 se muestran los efectos de variar  $h$  sobre varias gráficas de adaptación; como se observa claramente, cambia fundamentalmente la frecuencia de funcionamiento, y el nivel de adaptación. El ancho de banda cambia muy poco. Tiene una ligera influencia sobre el nivel de adaptación de las dos resonancias, aunque en todos los casos aparecen dos resonancias en la adaptación.

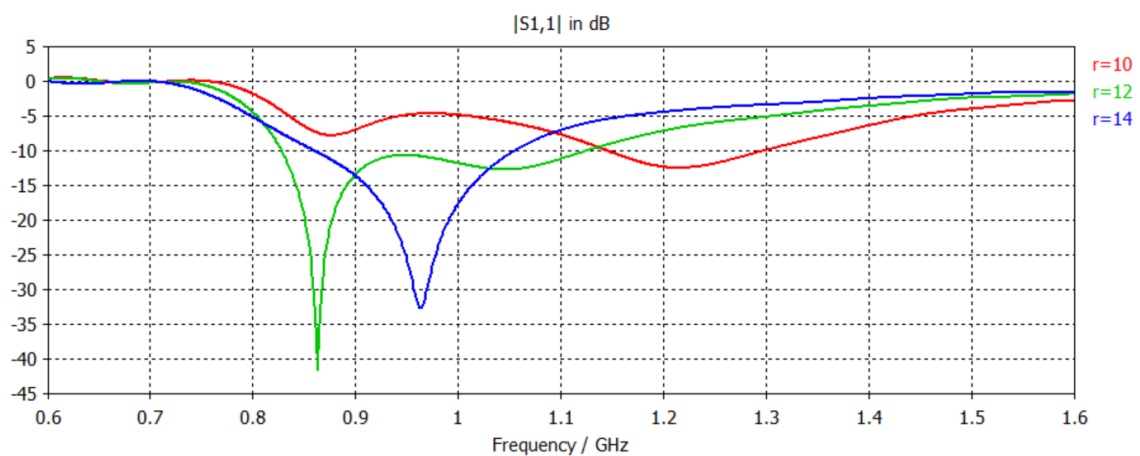


**Figura 3.1.7. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $h$ .**

### Variación del radio del disco de alimentación

El parámetro  $r$  hace referencia al radio del disco de alimentación; es importante destacar que este disco no es el parche radiante.

Se fijan las siguientes dimensiones:  $a=88$  mm,  $g=7$  mm,  $h=24.2$  mm,  $w=31$  mm. En la Figura 3.1.8 se puede observar la influencia del parámetro  $r$ . Cambia de forma considerablemente la forma de la curva de adaptación, ya que por ejemplo cuando  $r=14$ mm solo aparece un pico de adaptación y con  $r=12$ mm aparecen dos picos de adaptación, aunque es evidente que uno adapta mucho mejor que el otro. El nivel de adaptación también se ve muy afectado, y como consecuencia el ancho de banda. La frecuencia de funcionamiento cambia muy ligeramente.

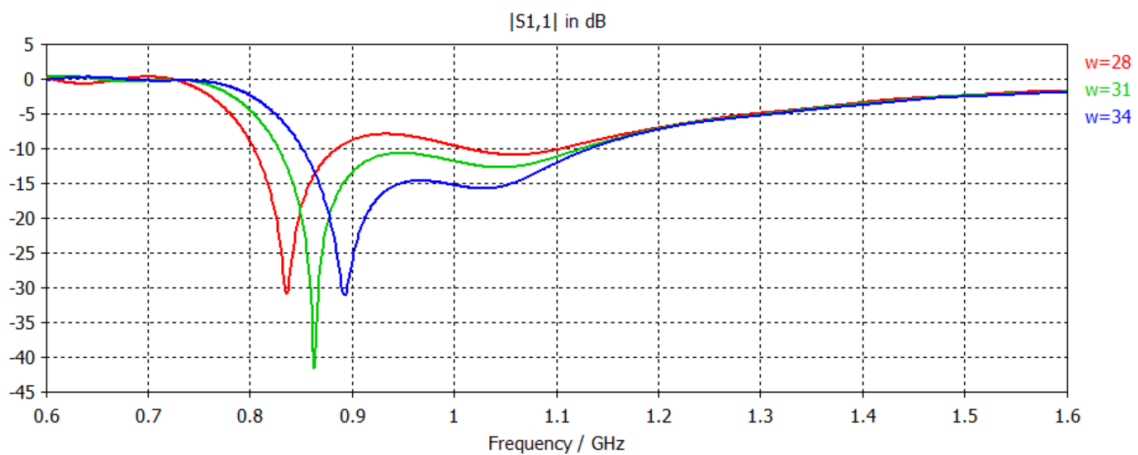


**Figura 3.1.8. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $r$**

### Variación del ancho de las paredes de cortocircuito

El parámetro  $w$  hace referencia a la anchura de las paredes de cortocircuito.

Se fijan las siguientes dimensiones:  $a=88$  mm,  $g=7$  mm,  $h=24.2$  mm,  $r=12$  mm. En la Figura 3.1.9 se observan varias gráficas de adaptación correspondientes a varios valores de  $w$ . Se puede ver que no influye en la forma de la curva de adaptación (en este caso se ve que para los 3 valores probados la forma es igual, con dos resonancias siendo de mayor adaptación la de frecuencia menor). También se observa una clara relación entre nivel de adaptación y ancho de banda: si se desea un nivel de adaptación elevado el ancho de banda descende. Afecta levemente a la frecuencia de la primera resonancia.

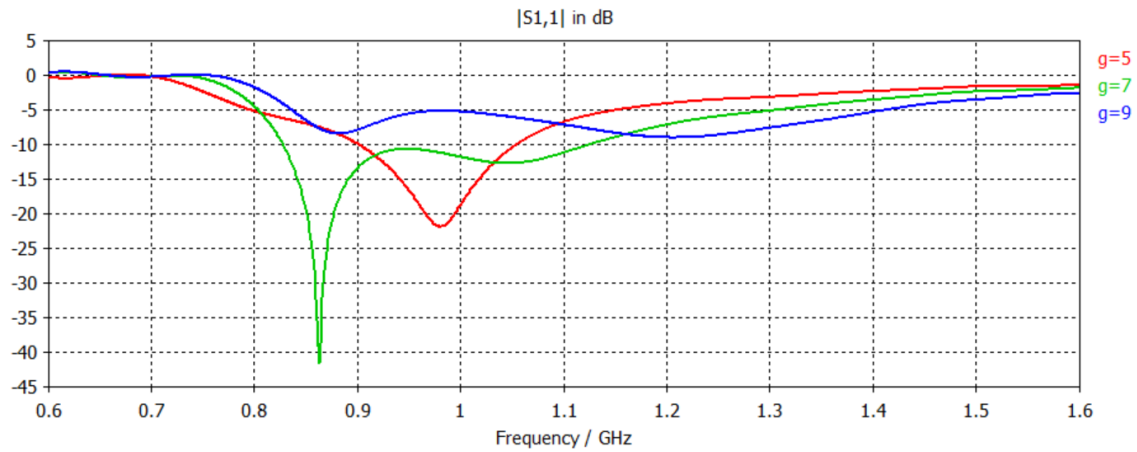


**Figura 3.1.9. Adaptación de la antenna para diferentes valores del parámetro  $w$ .**

### Variación de la distancia entre el disco de alimentación y el parche

El parámetro  $g$  hace referencia a la distancia que separa el disco de alimentación y el parche cuadrado radiante.

Se fijan las siguientes dimensiones:  $a=88$  mm,  $h=24.2$  mm,  $r=12$  mm,  $w=31$  mm. En la Figura 3.1.10 se observan los efectos de variar este parámetro. Es evidente que este parámetro afecta a la forma que tiene la curva de adaptación, ya que puede tener dos resonancias o sólo una. Cambia drásticamente los niveles de adaptación, y como consecuencia de ello el ancho de banda: a mayor ancho de banda, menor nivel de adaptación en el centro de la banda.

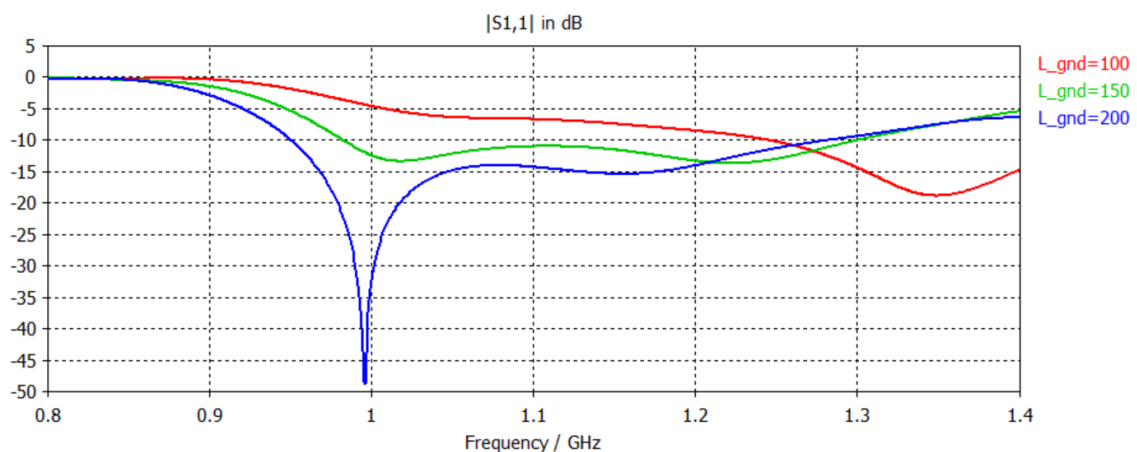


**Figura 3.1.10. Diferentes gráficas de adaptación correspondientes a diferentes valores del parámetro  $g$ .**

### Variación del plano de masa

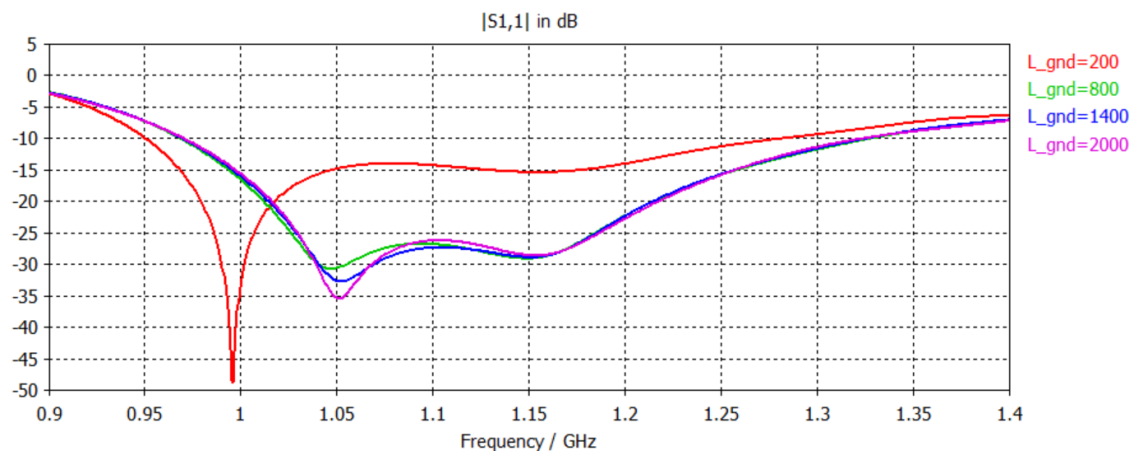
El resto de dimensiones de la antena son:  $a=78.71$  mm,  $g=6.26$  mm,  $h=21.64$  mm,  $r=10.73$  mm,  $w=30.41$  mm.

La influencia de las dimensiones del plano de masa se convierte en un factor importante para esta estructura, ya que como se puede ver en la Figura 3.1.11 la adaptación ve empeorado tanto su ancho de banda como su nivel de adaptación cuando el plano de masa disminuye respecto a su valor óptimo; esta característica es muy común en las antenas de parche, pero se puede ajustar la dimensión del plano de masa de forma muy fácil para tener la adaptación óptima. Para esta antena, se ha determinado que el valor óptimo del lado del plano de masa es de 200mm.



**Figura 3.1.11. Adaptación de la antena para diferentes valores (pequeños) del lado del plano de masa.**

También es interesante estudiar el efecto que tiene el aumento del plano de masa a dimensiones muy grandes, ya que la antenna es muy interesante para su uso en comunicaciones móviles y para ser integrada sobre otras superficies; por ejemplo, si se quiere integrar esta antenna sobre el techo de un coche o sobre el ala de un avión es evidente que el plano de masa de la antenna es muchísimo más pequeño que la superficie metálica sobre la que se integra. En la Figura 3.1.12 se pueden observar gráficas de adaptación para varias dimensiones del plano de masa; la del plano de masa más pequeño (lado de 200 mm, aproximadamente  $0.7 \cdot \lambda$ ) hace referencia al valor óptimo de adaptación, ya que presenta buen nivel de adaptación, buen ancho de banda y dimensiones no muy grandes. La gráfica de adaptación del plano de masa más grande (lado de 2 metros, aproximadamente  $7 \cdot \lambda$ ) muestra que la banda que adapta lo hace a un nivel mejor cuanto más grande es el plano de masa, mantiene el ancho de banda pero aumenta ligeramente la frecuencia de funcionamiento.



**Figura 3.1.12. Adaptación de la antenna para diferentes valores (grandes) del lado del plano de masa.**

## Conclusiones

De este análisis se pueden clasificar los parámetros por su influencia sobre las características de la antenna. Para ajustar la frecuencia de funcionamiento se modificarán los parámetros  $a$  y  $h$ , principalmente el primero porque si  $h$  aumenta demasiado la antenna es demasiado alta. Después, dependiendo del nivel de adaptación que se necesite, se ajustarían los parámetros  $r$  y  $g$  para que la curva de adaptación tenga la forma deseada: con una sola resonancia (para los casos en que se necesita mucho nivel de adaptación en el centro de la banda de funcionamiento) o con dos resonancias para maximizar el ancho de banda. Por último, el parámetro  $w$  es muy

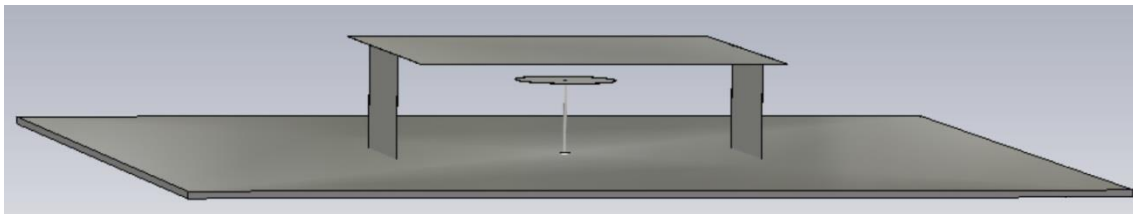
útil para ajustar el nivel de adaptación al nivel óptimo, ya que apenas afecta a la frecuencia de funcionamiento ni a la forma de la curva de adaptación.

Si la aplicación de la antena incluye su integración sobre alguna superficie metálica, habría que tener en cuenta las dimensiones de la superficie donde se va a incluir y contar con el aumento de frecuencia que traería asociado; de este modo, ajustando fundamentalmente los parámetros  $a$  y  $h$  se ajustaría a la frecuencia deseada.

### 3.1.3 Prototipo para la banda de radionavegación aérea

En este apartado se va a presentar una antena con la estructura de la presentada en este capítulo adaptada a las necesidades de la banda de radionavegación aérea comentada en los objetivos del trabajo de fin de grado; como consecuencia va a cumplir con las condiciones de ROE que se especifican para ésta banda. A su vez, debe tener un diagrama lo más parecido posible al monopolar.

Las dimensiones de la antena realizada (en relación al esquema de la Figura 3.1.1) son:  $a=78.71$  mm,  $g=6.26$  mm,  $h=21.64$  mm,  $r=10.73$  mm,  $w=30.41$  mm. Un modelo 3D de la antena con el plano de masa se puede ver en la Figura 3.1.13.

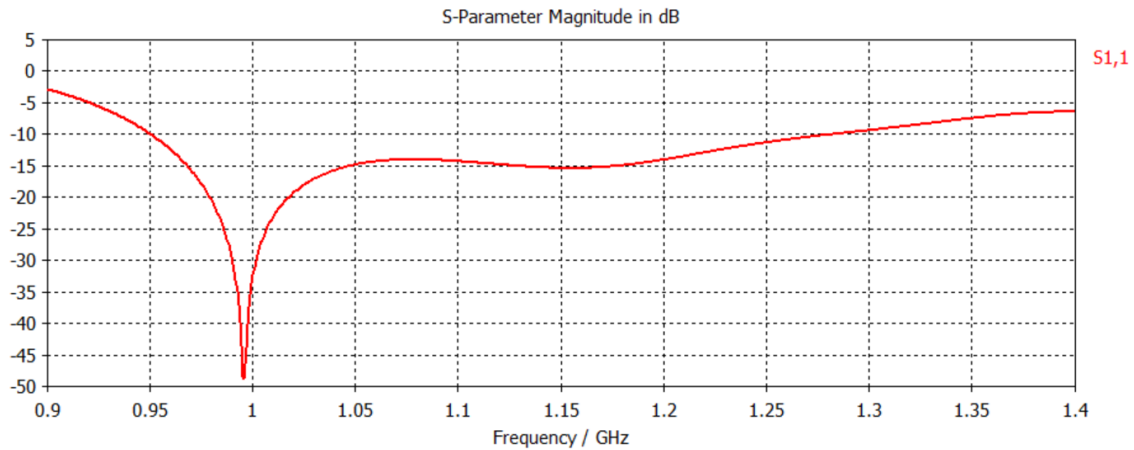


**Figura 3.1.13. Modelo en tres dimensiones de la antena 3.1.3.**

En primer lugar se va a proceder a analizar la gráfica de adaptación, ya que determina en gran medida el ancho de banda de la antena. En éste caso se necesita gran nivel de adaptación en el centro de la banda de operación (en torno a -14 dB) y un menor nivel de adaptación en los extremos de la banda de funcionamiento. El parámetro  $|S_{11}|$  (en dB) se puede ver en la Figura 3.1.14; como se puede apreciar, la curva de adaptación está formada por dos resonancias, siendo la resonancia que aparece a la frecuencia menor la que presenta mayor nivel de adaptación. La segunda resonancia no consigue tanto nivel de adaptación, y al ser mucho menos pronunciada contribuye de forma amplia al ancho de banda.

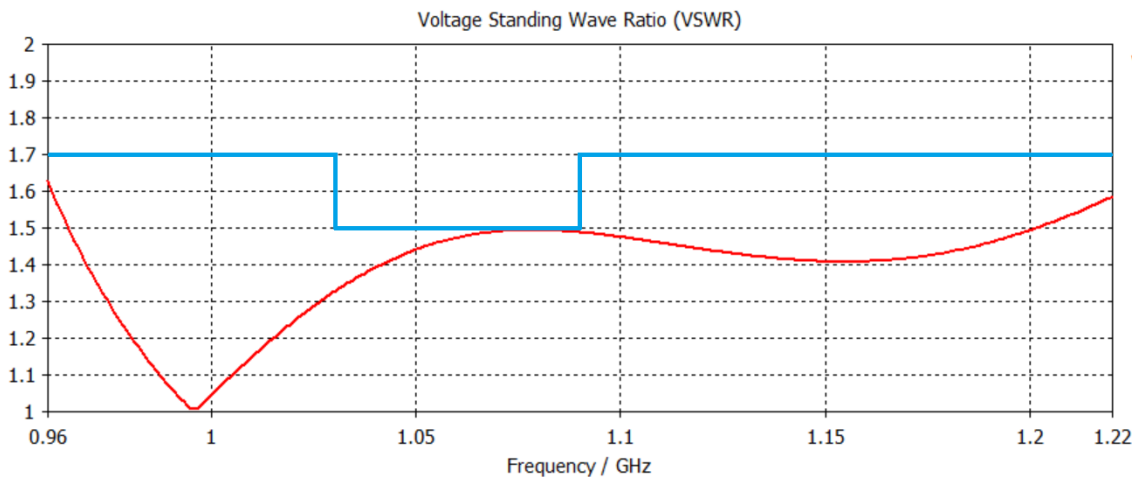


De esta forma, el ancho de banda a -10 dB, que es el que se ha tenido en cuenta en el resto del trabajo de fin de grado, es de 334 MHz a una frecuencia central de 1116 MHz, que equivale al 29.9%. El ancho de banda a -14 dB es de 235 MHz a la frecuencia central de 1083 MHz, que es el 21.7%.



**Figura 3.1.14. Parámetro  $|S_{11}|$  de la antena 3.1.3.**

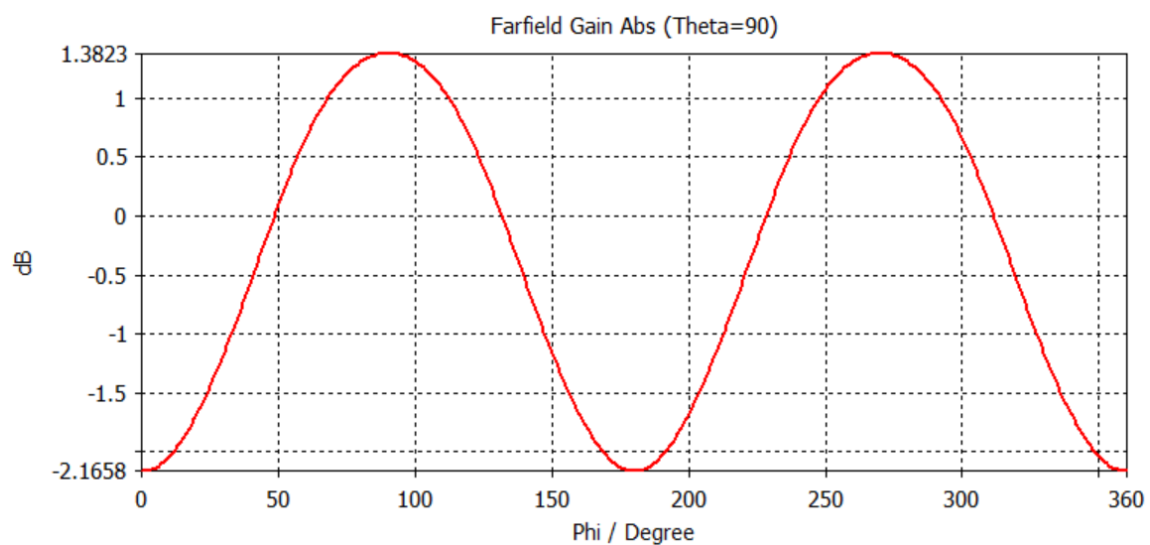
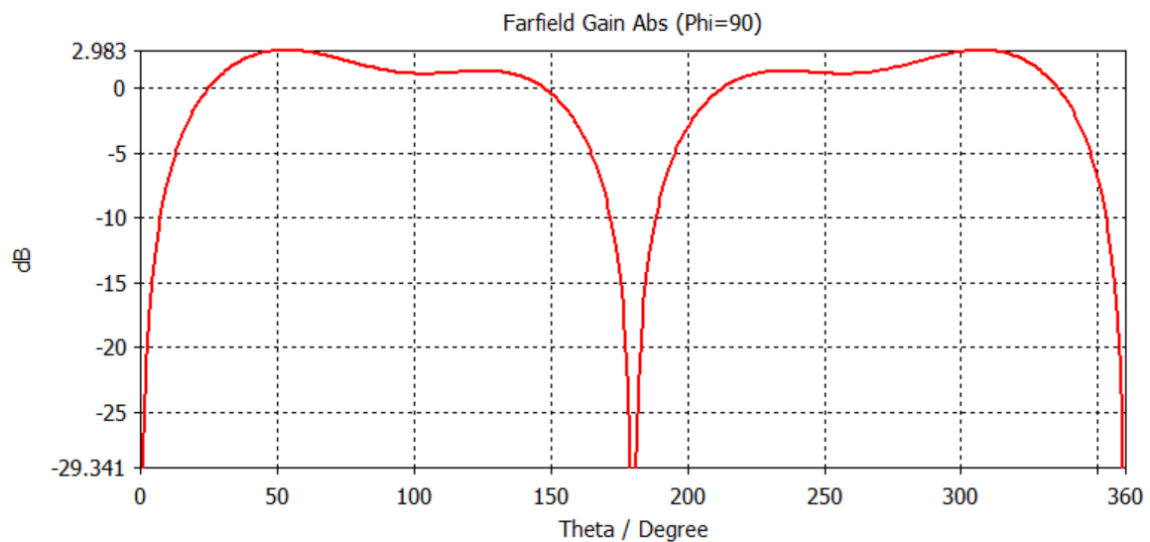
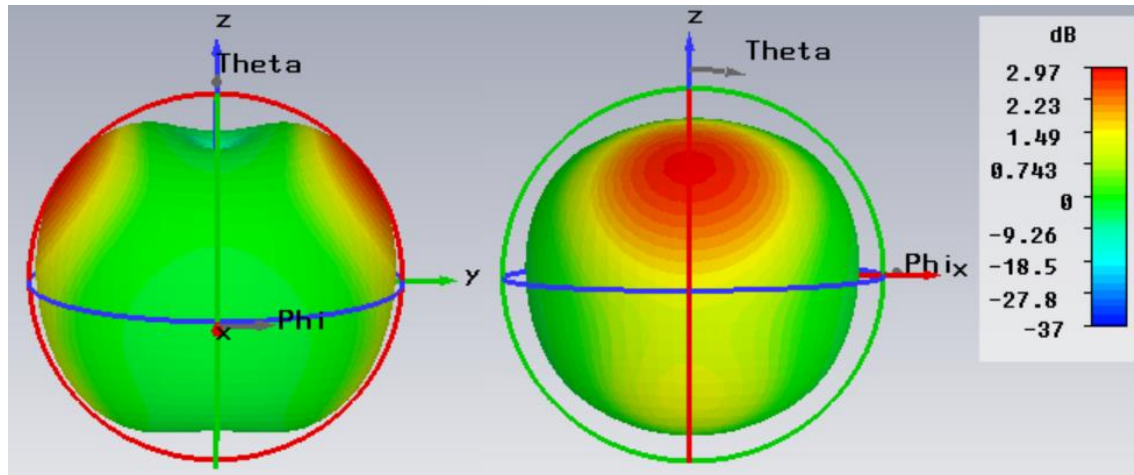
En la Figura 3.1.15 se puede ver la ROE de la antena en la banda de radionavegación aérea (en rojo) y la ROE mínima requerida para cada frecuencia (en azul). Como se puede comprobar, se cumplen los requisitos de ROE en toda la banda de funcionamiento, aunque en el centro de la banda bastante justo.



**Figura 3.1.15. ROE de la antena 3.1.3 (en rojo) y ROE máxima en cada frecuencia (en azul).**

Al tratarse de una antena de banda ancha, es importante analizar el diagrama de radiación a lo largo de toda la banda de operación. En las figuras 3.1.16, 3.1.17, 3.1.18, 3.1.19 y 3.1.20 se pueden observar los diagramas de radiación y cortes con los planos YZ y XY para cinco frecuencias diferentes a lo largo de la banda de funcionamiento;

esto es interesante para conocer con detalle el parecido que tiene el diagrama de radiación con el monopolar.



**Figura 3.1.16. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 960 MHz.**

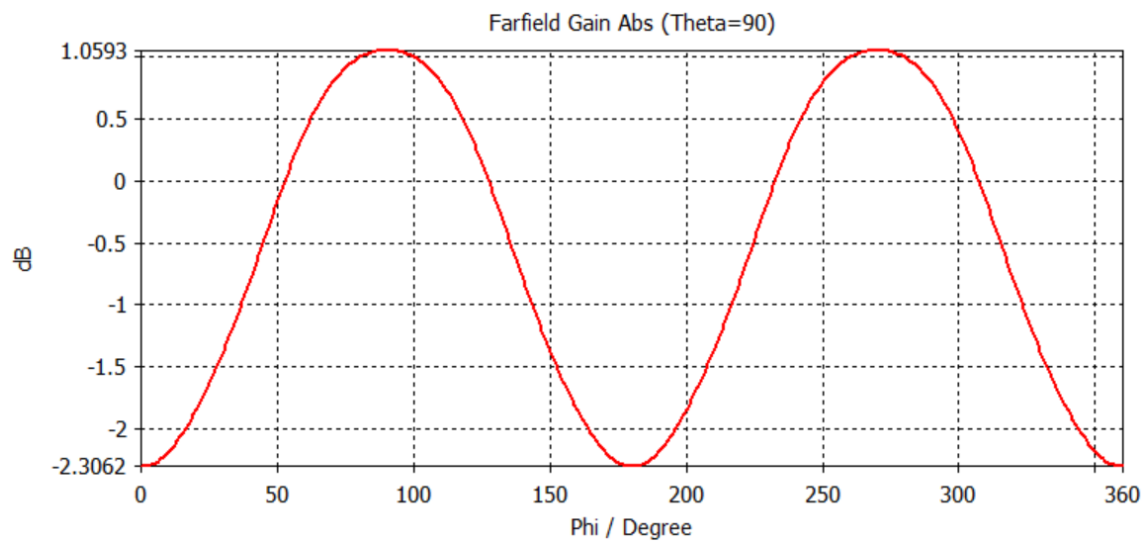
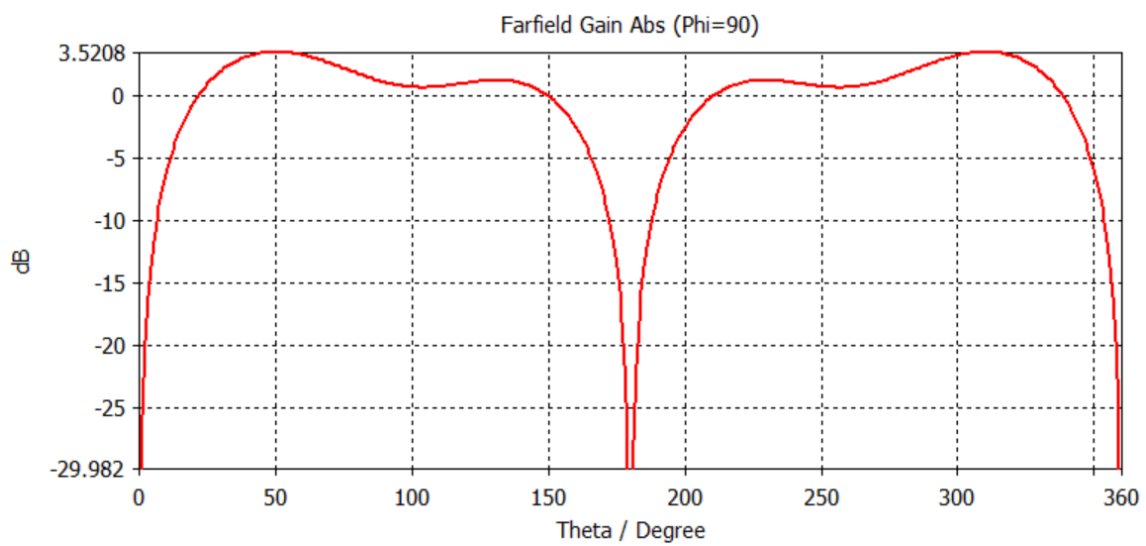
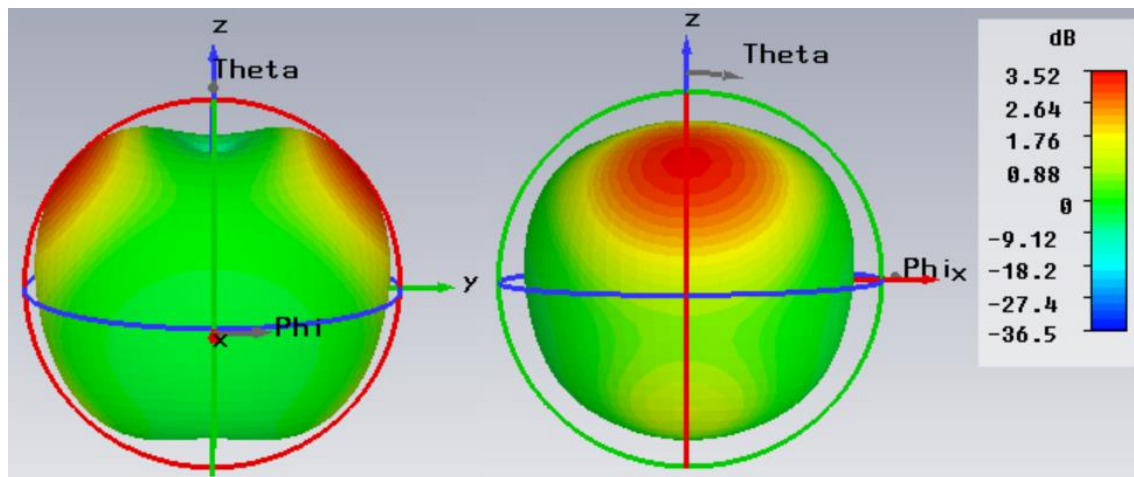


Figura 3.1.17. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 1025 MHz.

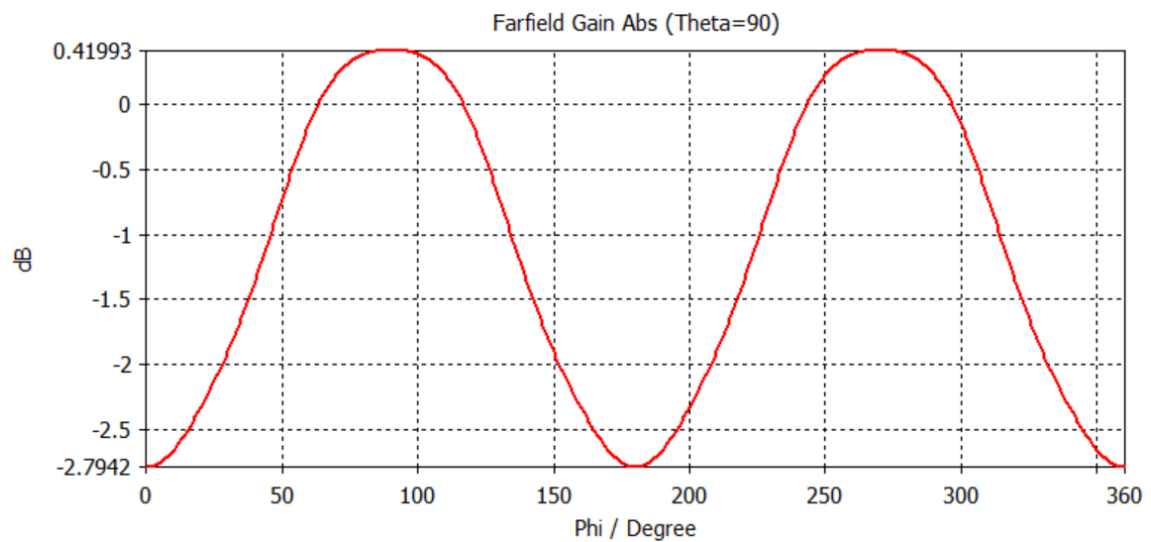
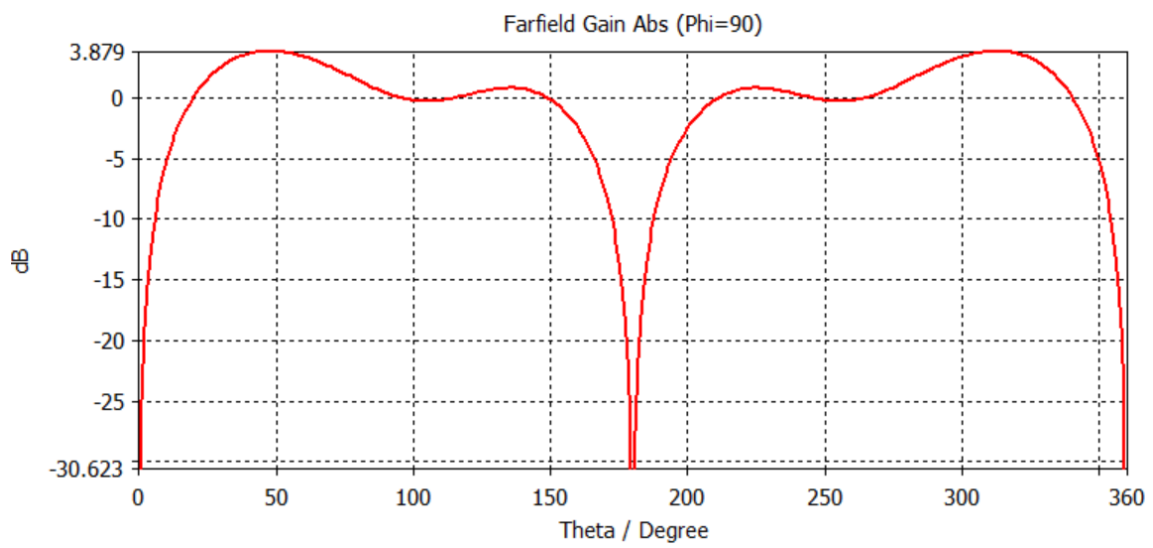
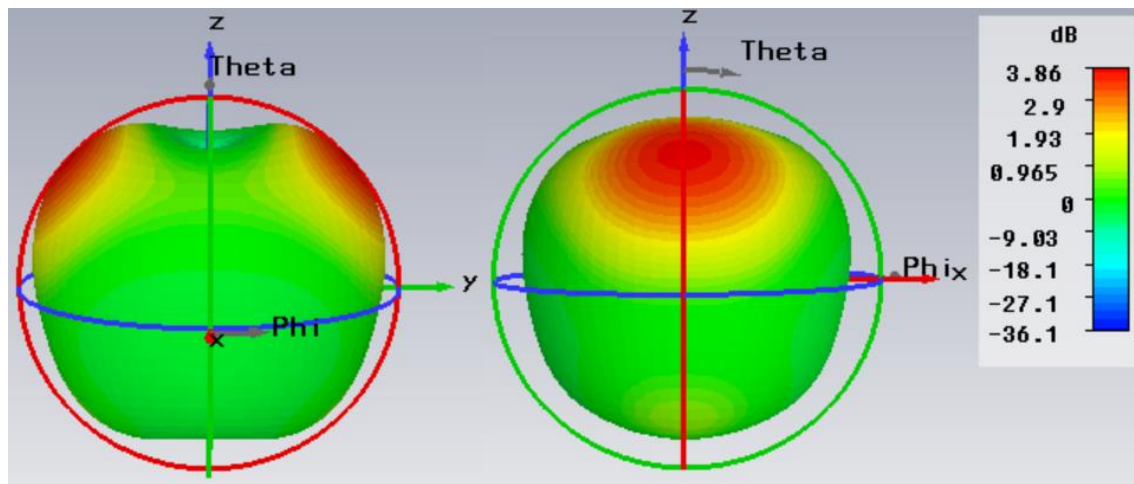


Figura 3.1.18. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 1090 MHz.

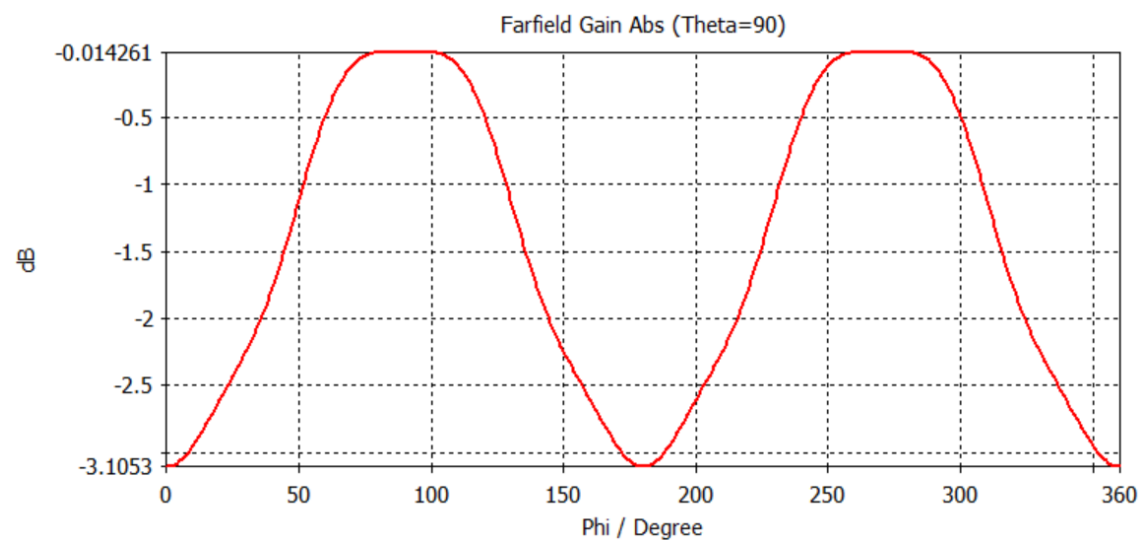
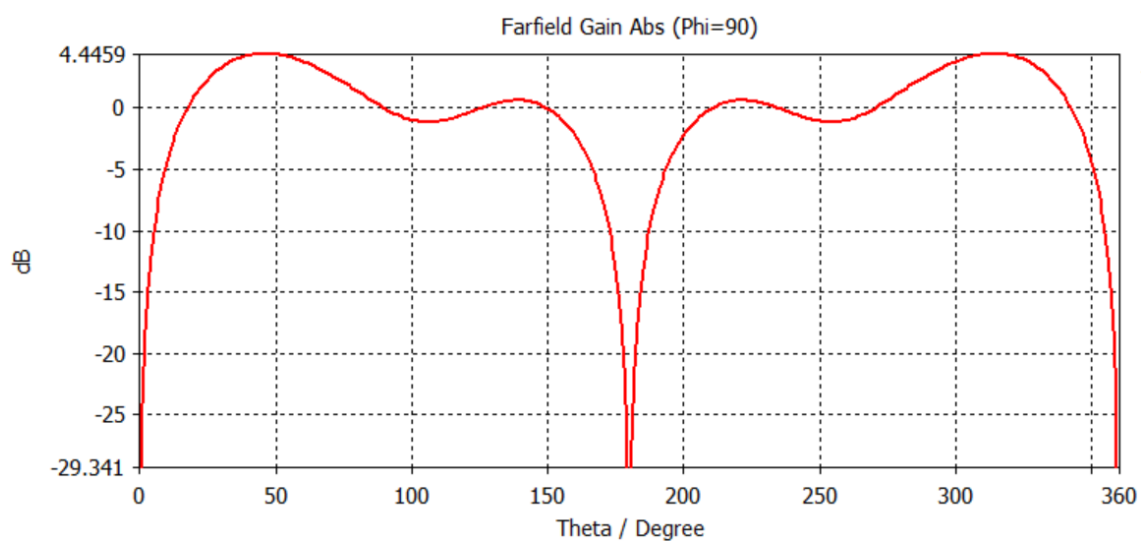
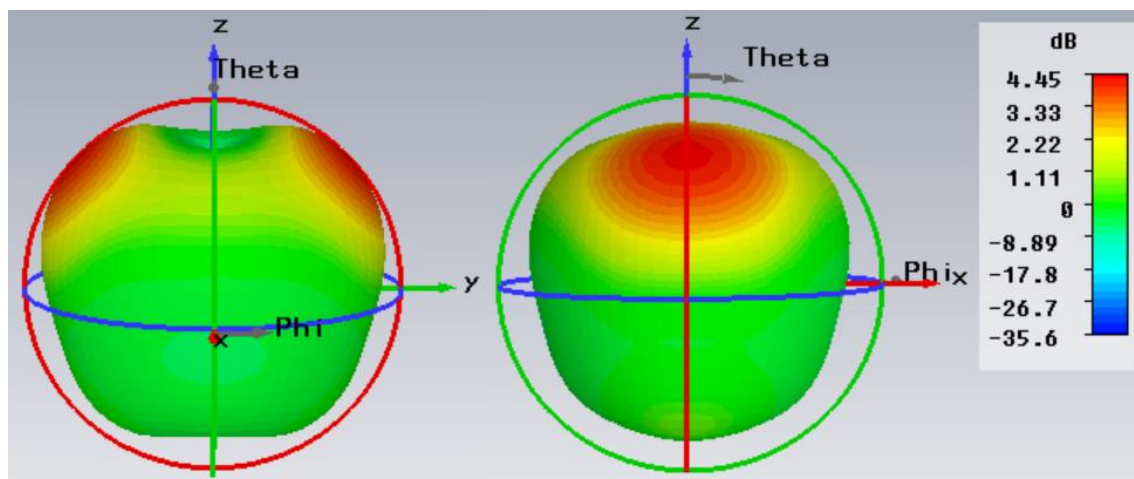


Figura 3.1.19. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 1155 MHz.

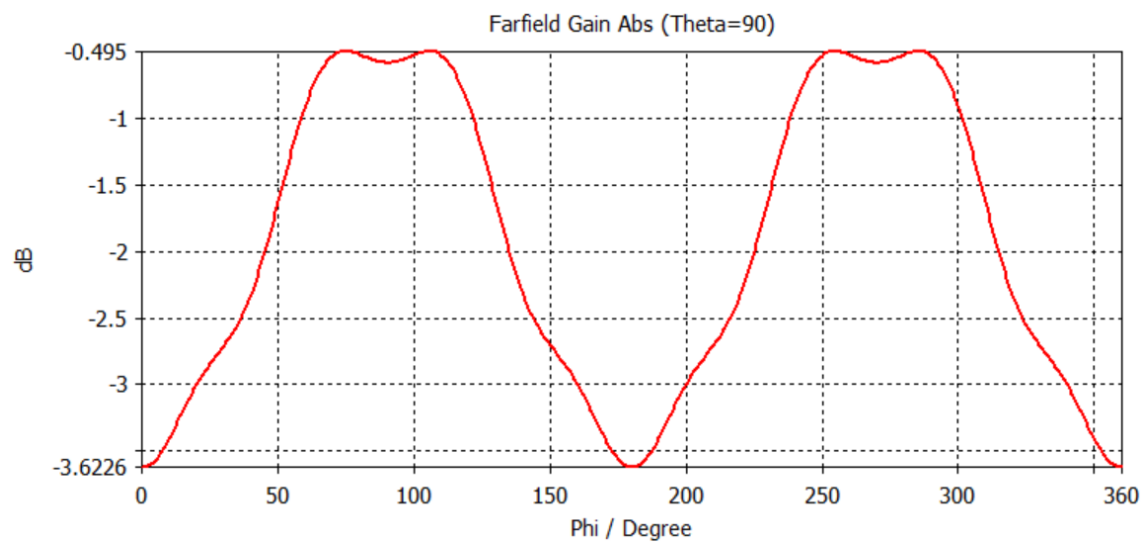
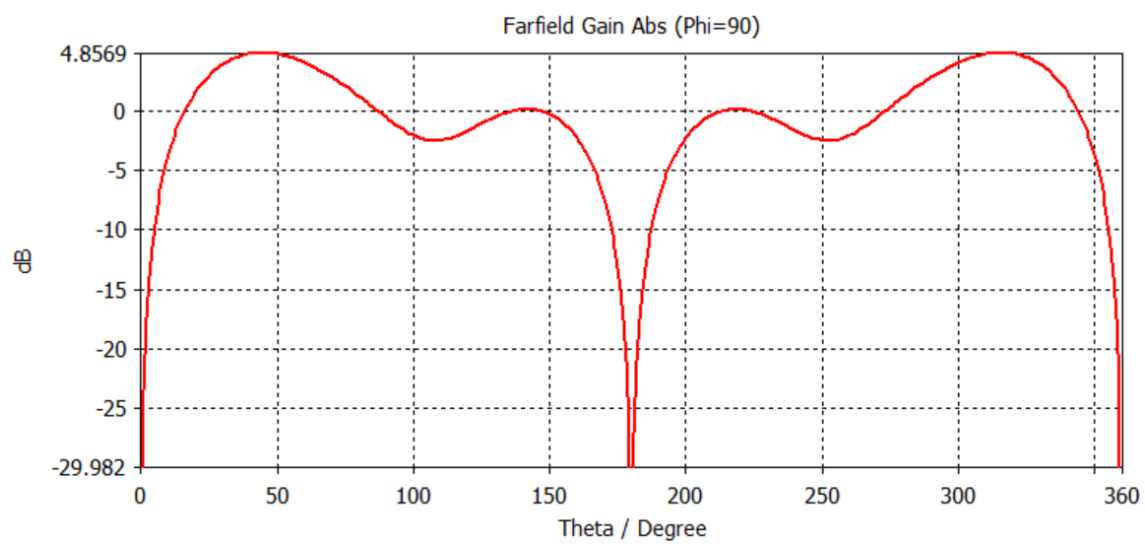
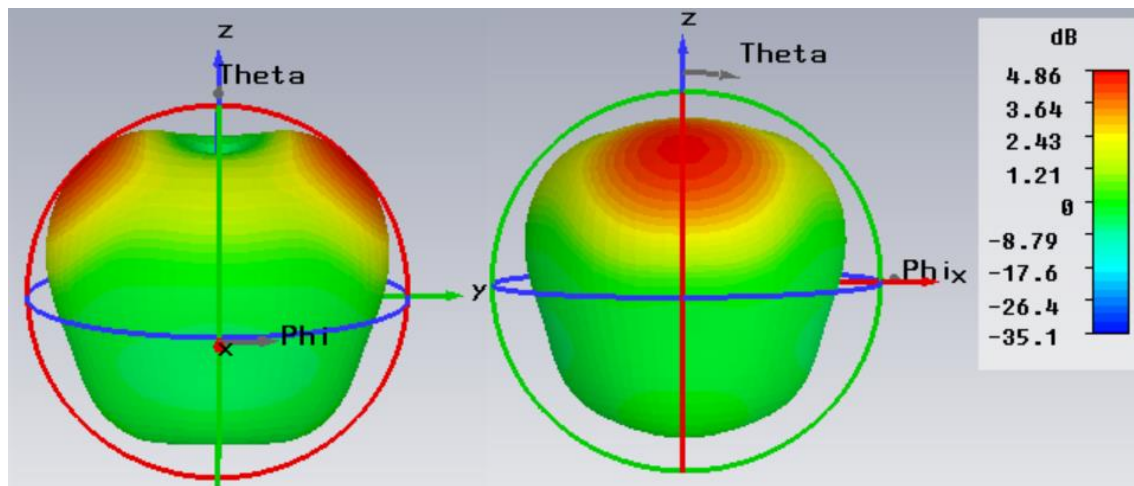
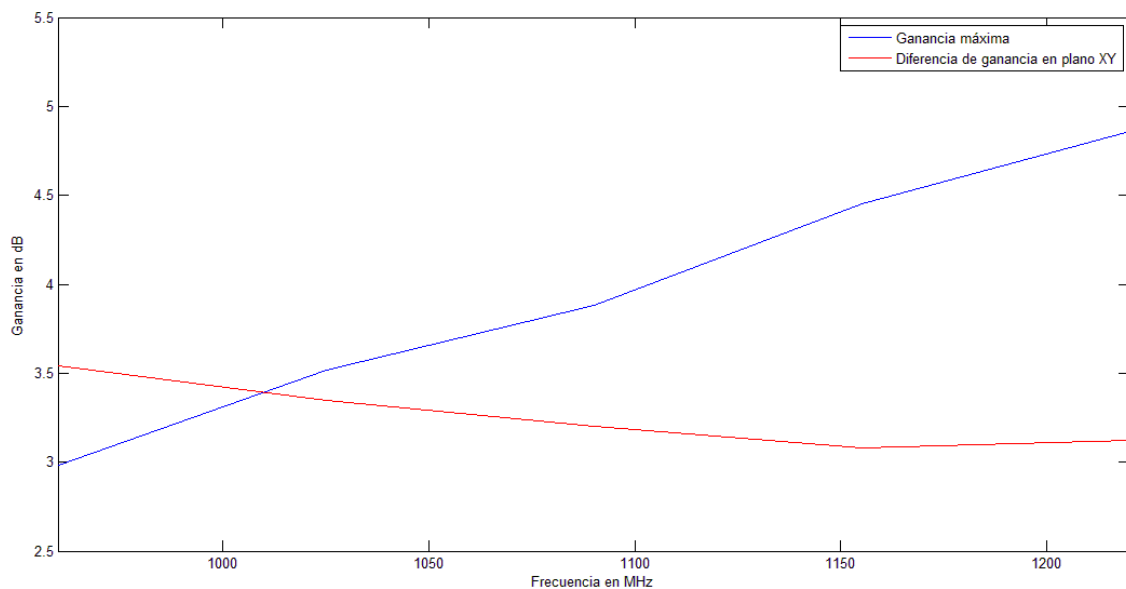


Figura 3.1.20. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano ZY y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.1.3 a 1220 MHz.

Para determinar la similitud con el diagrama de radiación de tipo monopolar, se definen dos valores: el primero es la ganancia máxima, ya que a mayor nivel de ganancia menor similitud con el diagrama de radiación de tipo monopolar porque la distribución de potencia en un diagrama de radiación monopolar es muy uniforme, y esto implica una ganancia baja (aproximadamente 1.76 dB); el segundo es la diferencia entre ganancia máxima y ganancia mínima que existe en el corte con el plano XY porque en un diagrama de radiación monopolar el plano horizontal es omnidireccional. Éstos dos valores se pueden ver en la Figura 3.1.21; la ganancia máxima aumenta con el aumento de la frecuencia (pasando de 3 dB en la frecuencia inferior a 4.8 dB en la frecuencia superior), estando los dos picos de ganancia máxima situados en las direcciones donde no hay paredes de cortocircuito; la ganancia máxima es aproximadamente 3dB superior a la ganancia típica de los diagramas de radiación monopulares, en unidades naturales el doble. La diferencia de ganancia en el plano XY se mantiene bastante estable en torno a 3.2 dB. Esto implica que, si se fija  $\theta = 90^\circ$ , se va a radiar aproximadamente el doble de potencia en  $\phi = 90^\circ$  y  $\phi = 270^\circ$  que en  $\phi = 0^\circ$  y  $\phi = 180^\circ$ .



**Figura 3.1.21. Ganancia máxima y diferencia de ganancia en el plano XY en la banda de funcionamiento.**

## Conclusiones

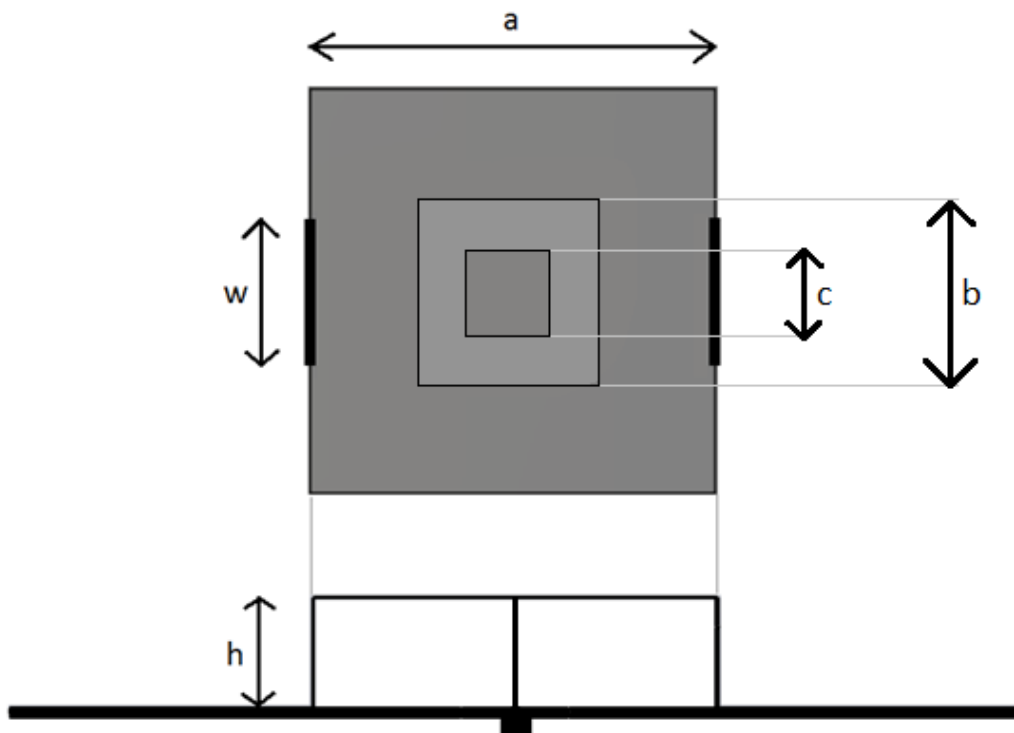
Como se ha demostrado, esta antena cumple los requisitos de ROE en la banda en que se quiere utilizar. Además, presenta un diagrama de radiación parecido al monopolar, ya que mantiene los nulos de radiación en  $\theta = 0^\circ$  y  $\theta = 180^\circ$ ; además tiene cierta estabilidad en todo  $\phi$  ya que radia la potencia de forma bastante bien distribuida, creando un diagrama de radiación que permite utilizar la antena para radionavegación aérea.



## 3.2 Parche de anillo cuadrado con paredes de cortocircuito

### **3.2.1 Estructura, dimensiones de la antena y funcionamiento**

La antena de este apartado tiene como base de la estructura un anillo cuadrado con paredes de cortocircuito en dos de sus lados; la alimentación se realiza mediante una placa metálica cuadrada situada en el centro del anillo y que está conecta a un cable coaxial. La estructura de la antena, así como sus dimensiones están indicadas en la Figura 3.2.1.

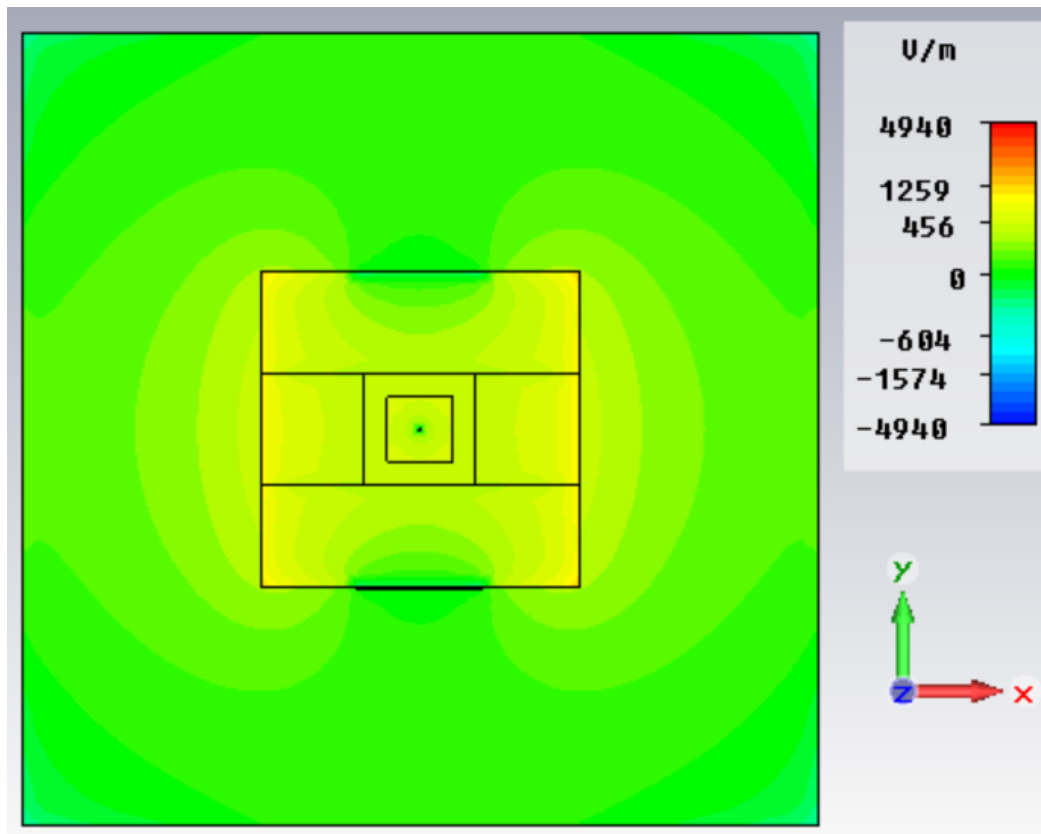


**Figura 3.2.1. Esquema de la estructura de la antena 3.2. Vista de perfil y de planta.**

Al igual que en la antena analizada en el apartado anterior, en la presente antena las paredes de cortocircuito fuerzan que el campo eléctrico en dirección  $z$  sea nulo en los puntos cortocircuitados cumpliendo la condición de contorno de conductor perfecto de las ecuaciones de Maxwell,  $\vec{E} \cdot \hat{n} = 0$ . El campo eléctrico (Figura 3.2.2) es prácticamente constante en los bordes donde no hay pared de cortocircuito, y en los bordes donde hay pared de cortocircuito el campo aumenta ligeramente cuando la distancia a la pared de cortocircuito aumenta. El diagrama de radiación (Figura 3.2.3)



es similar al monopolar; esto es lógico ya que el campo eléctrico en los dos bordes sin pared de cortocircuito es de igual magnitud y fase, lo que crea dos corrientes magnéticas de igual magnitud y sentido contrario a una distancia  $a$ . Pero también hay que tener en cuenta la aportación del campo eléctrico en otras zonas, como por ejemplo los bordes interiores del anillo o la placa de alimentación cuadrada, que contribuyen a empeorar el diagrama de radiación respecto al monopolar ideal. El deterioro del diagrama de radiación se puede observar en que la ganancia es muy grande (alrededor de 5.37 dB) en  $\theta = 45^\circ$ ; también se observa un aumento de la ganancia en  $\theta = 144^\circ$  que se observa en el corte con el plano XZ de la Figura 2.5.4. También es destacable la diferencia entre la ganancia máxima y mínima que hay en el corte con el plano XY (Figura 2.5.5) que es de 3.5 dB. Esto implica que la distribución de potencia en el plano XY no es igual para todos los valores de  $\phi$ , siendo la potencia máxima radiada aproximadamente 2.23 veces la potencia mínima radiada.



**Figura 3.2.2. Campo eléctrico en dirección z de la antena 3.2.**

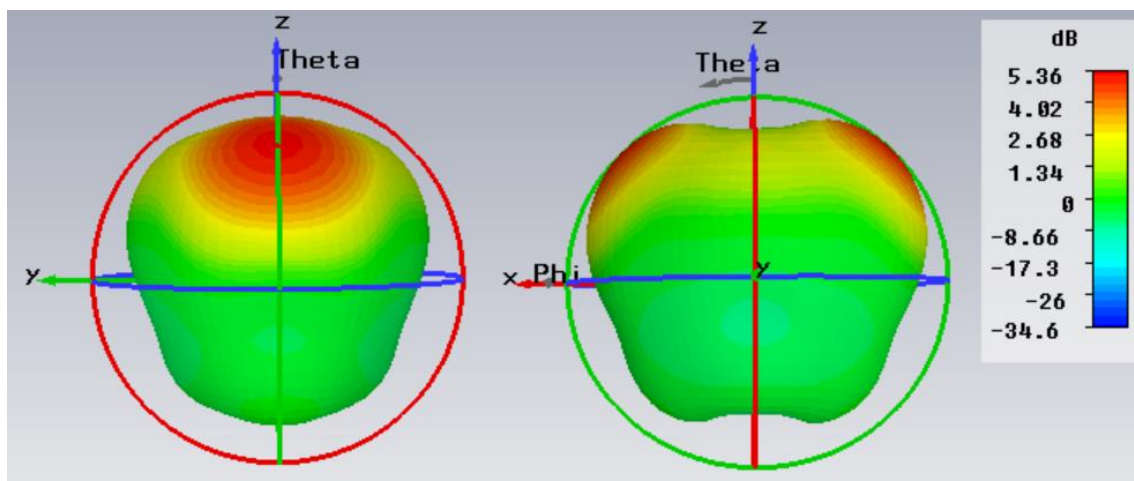


Figura 3.2.3. Diagrama de radiación de la antena 3.1.

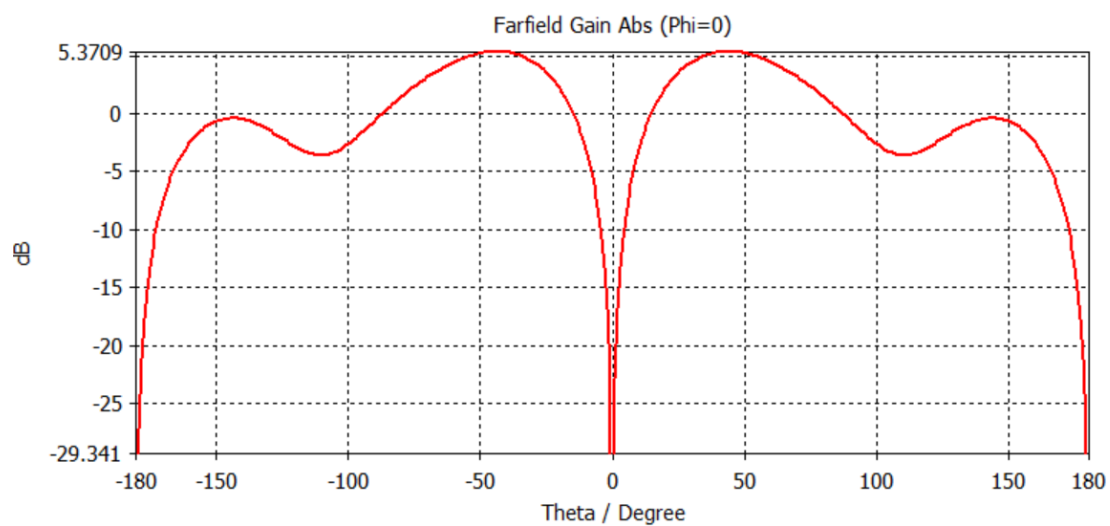


Figura 3.2.4. Diagrama de radiación en el plano XZ de la antena 3.2.

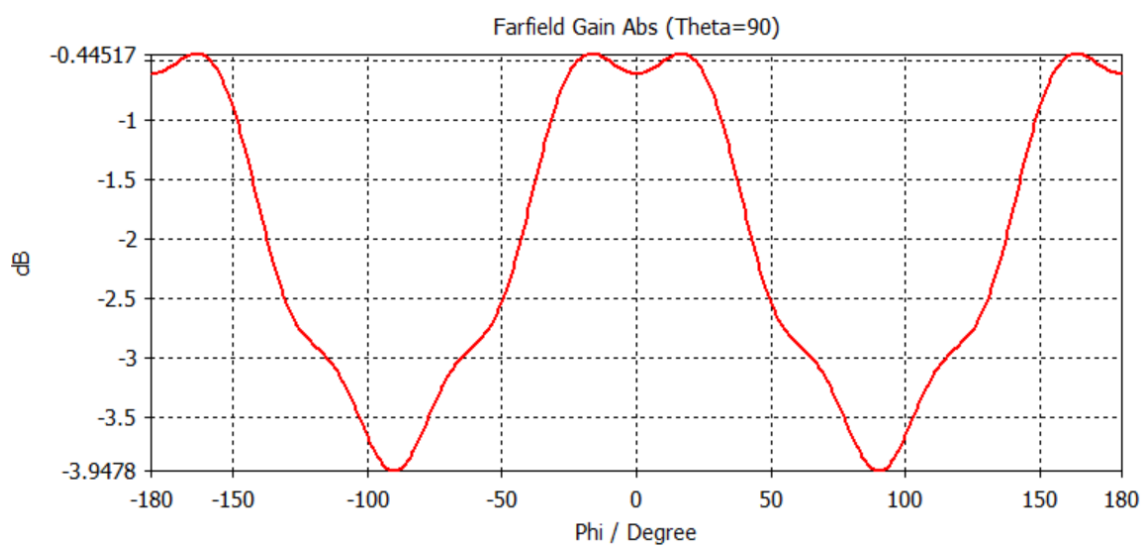


Figura 3.2.5. Diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.

### 3.2.2 Estudio paramétrico

En este apartado se van a analizar los efectos que tienen las diferentes dimensiones de la antena sobre las características fundamentales de la antena, como son la frecuencia de funcionamiento, el nivel de adaptación, el ancho de banda o la forma que tiene la curva de adaptación.

#### Variación del lado exterior del anillo

El parámetro  $a$  hace referencia al lado exterior del anillo.

Se dejan fijas las siguientes dimensiones:  $b=31$  mm,  $c=18$  mm,  $h=19$  mm,  $w=35$  mm. Como se puede observar en las simulaciones realizadas para varios valores de  $a$  (Figura 3.2.6) el parámetro  $a$  influye fundamentalmente sobre la frecuencia de funcionamiento. En las pruebas realizadas se puede aproximar como  $a \approx 0.31 \cdot \lambda$ , aunque hay que destacar que no es el único parámetro que influye sobre la frecuencia de funcionamiento. Hay que tener en cuenta que para las pruebas realizadas se han mantenido constantes el resto de parámetros.

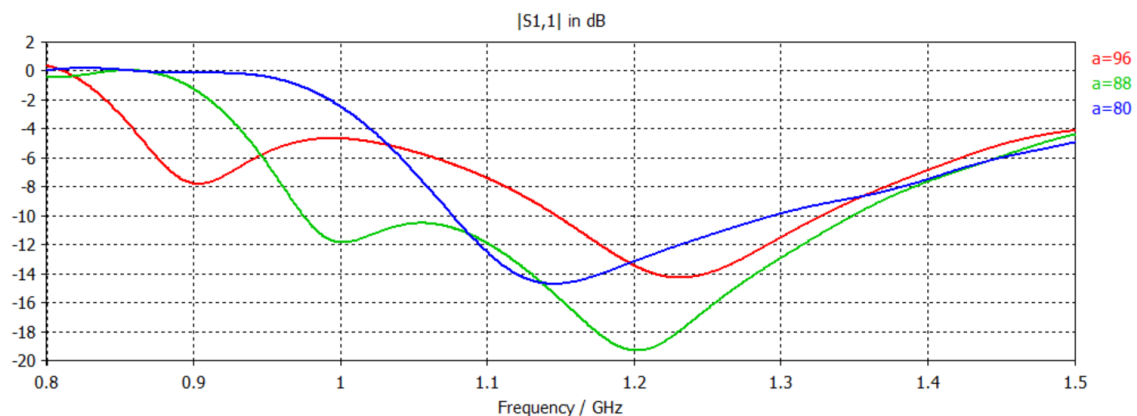
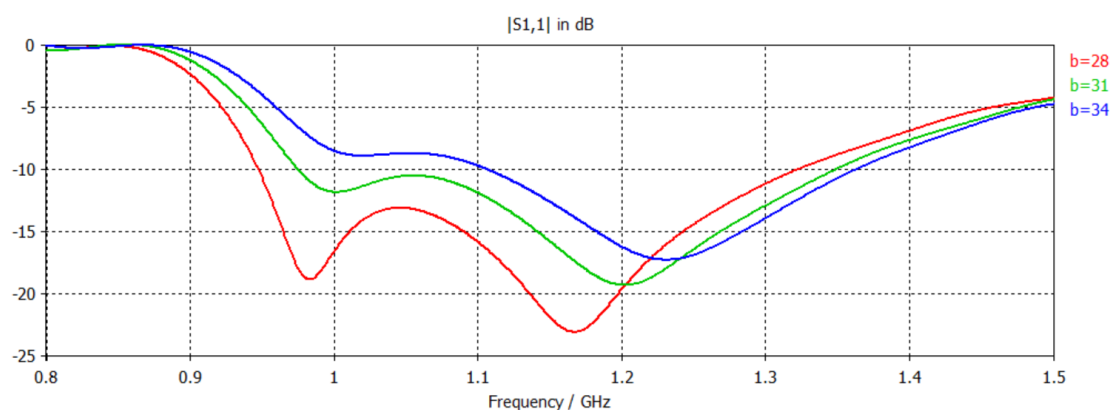


Figura 3.2.6. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $a$ .

#### Variación del lado interior del anillo

El parámetro  $b$  hace referencia al lado interior del anillo. Hay que tener en cuenta que junto al parámetro  $c$ , condiciona la distancia que hay entre la placa de alimentación y el anillo.

Se dejan fijas las siguientes dimensiones:  $a=88$  mm,  $c=18$  mm,  $h=19$  mm,  $w=35$  mm. Se han hecho simulaciones para tres valores de  $b$  (Figura 3.2.7), donde se puede observar que cuando sus dimensiones se reducen el nivel de adaptación mejora; cuando aumenta su valor, el nivel de adaptación se reduce bastante, sobre todo la primera resonancia de la adaptación. Como consecuencia de esto, el ancho de banda disminuye si el parámetro  $b$  aumenta.

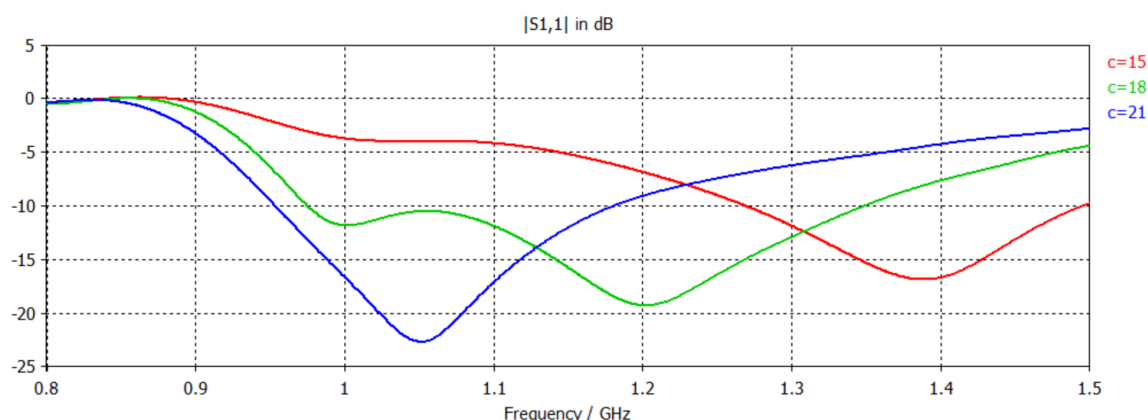


**Figura 3.2.7. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $b$ .**

### Variación del lado de la placa de alimentación

El parámetro  $c$  hace referencia al lado de la placa de alimentación situada en el centro del anillo.

Se dejan fijas las siguientes dimensiones:  $a=88$  mm,  $b=31$  mm,  $h=19$  mm,  $w=35$  mm. Como se puede observar en las pruebas realizadas de la Figura 3.2.8, el parámetro  $c$  tiene una gran influencia sobre la forma que tiene la curva de adaptación, ya que se puede escoger el valor deseado para tener una sola resonancia de adaptación muy buena o, de otro modo, tener dos resonancias para tener un ancho de banda mayor aunque menor nivel de adaptación; por lo general, casi siempre va a interesar la opción de maximizar el ancho de banda. Hay que tener en cuenta que para  $c=15$  mm y  $c=21$  mm el resto de parámetros que influyen en la adaptación no están ajustados óptimamente, por lo que es normal que el nivel de adaptación no sea el óptimo. También es evidente que influye sobre la frecuencia de funcionamiento, aunque si se desea que se junten las dos resonancias, el valor de  $c$  óptimo provoca que la relación entre frecuencia de funcionamiento y el parámetro  $a$  pase de  $a \approx 0.31 \cdot \lambda$  a  $a \approx 0.33 \cdot \lambda$ , que como es de banda ancha es despreciable.



**Figura 3.2.8. Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $c$ .**

### Variación de la altura del parche

El parámetro  $h$  hace referencia a la altura a la que se encuentra el parche respecto al plano de masa.

Se dejan fijas las siguientes dimensiones:  $a=88$  mm,  $b=31$  mm,  $c=18$  mm,  $w=35$  mm. En la Figura 3.2.9 se adjuntan los resultados de las pruebas realizadas variando el parámetro  $h$ . Se puede observar que cambia de forma notoria la frecuencia de funcionamiento cuando su valor cambia; como es lógico, cuanto menor es la dimensión mayor es la frecuencia de funcionamiento. En los ejemplos se puede ver que la adaptación no es óptima para el caso  $h=24$  mm ya que el resto de dimensiones son fijas, pero se solucionaría ajustando otros parámetros. En este caso no se puede establecer una relación lineal entre el parámetro  $h$  y la frecuencia de funcionamiento, ya que por ejemplo para  $h=24$ mm la relación es  $h/\lambda = 0.08$  y para  $h=14$ mm la relación es  $h/\lambda = 0.065$ .

Es interesante que cuando el valor de  $h$  baja se consigue un tamaño menor de la antena y un mayor ancho de banda; la principal desventaja es la dificultad de conseguir buen nivel de adaptación en toda la banda. Si se escoge un valor óptimo para el parámetro  $h$ , se puede conseguir un buen ancho de banda y a la vez buen nivel de adaptación. Es destacable que el valor de  $h$  no influye sobre la forma que tiene la curva de adaptación, ya que en todos los casos aparecen dos resonancias, aunque tengan diferente nivel de adaptación.

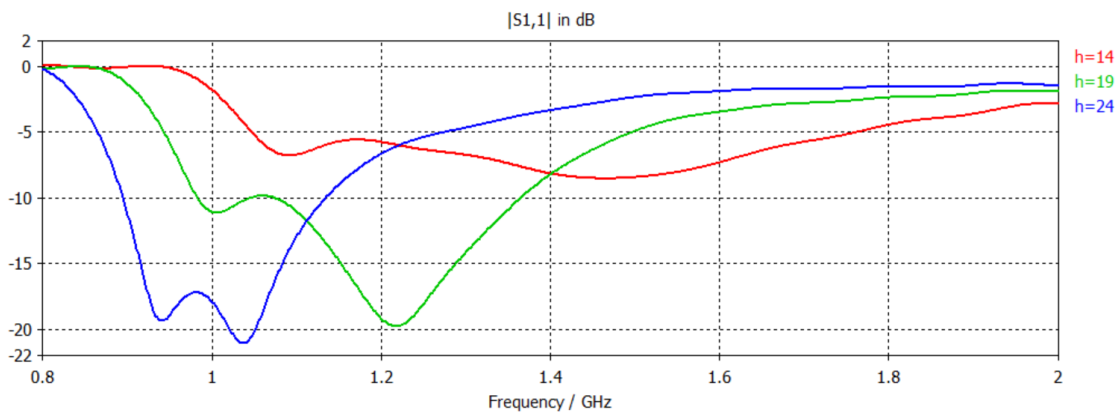
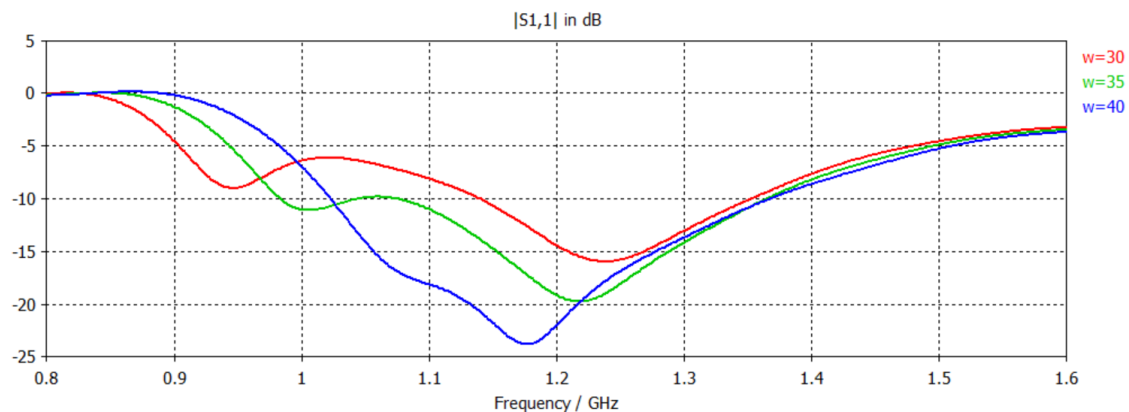


Figura 3.2.9 Adaptación de la antena para diferentes valores del parámetro  $h$ .

### Variación del ancho de las paredes de cortocircuito

El parámetro  $w$  hace referencia a la anchura que tienen las paredes de cortocircuito situadas en dos de los lados del anillo.

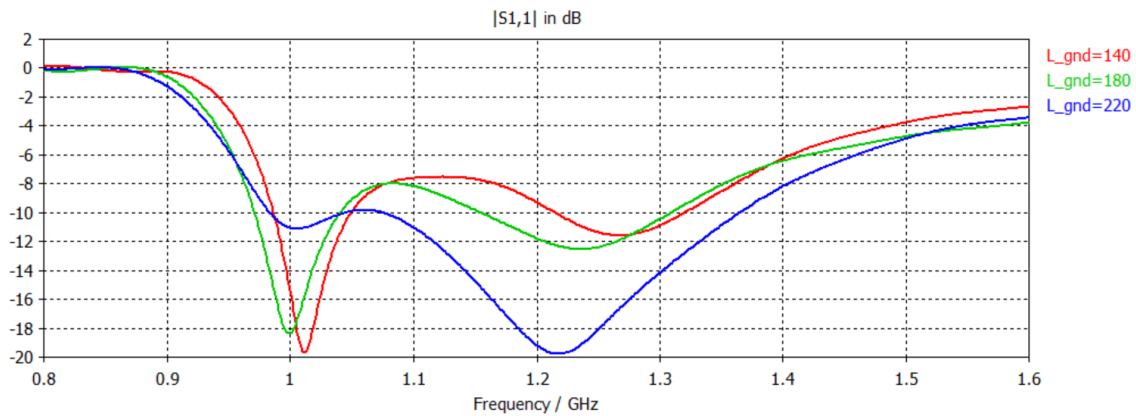
Se dejan fijas las siguientes dimensiones:  $a=88$  mm,  $b=31$  mm,  $c=18$  mm,  $h=19$  mm. Como se puede observar en las pruebas realizadas de la Figura 3.2.10, el parámetro  $w$  influye notablemente sobre el nivel de adaptación, manteniendo la frecuencia de funcionamiento superior y variando mínimamente la frecuencia inferior; es destacable que cuanto peor adapta la curva de adaptación es más plana y si el nivel de adaptación aumenta el ancho de banda se reduce. Comparando los casos de la gráfica se puede observar que en el caso de  $w=35$  mm el nivel de adaptación en el centro de la banda cumple el criterio de 10 dB de forma muy justa pero tiene más ancho de banda que el caso de  $w=40$  mm, que adapta a mejor nivel.



**Figura 3.2.10. Diferentes gráficas de adaptación correspondientes a diferentes valores del parámetro  $w$ .**

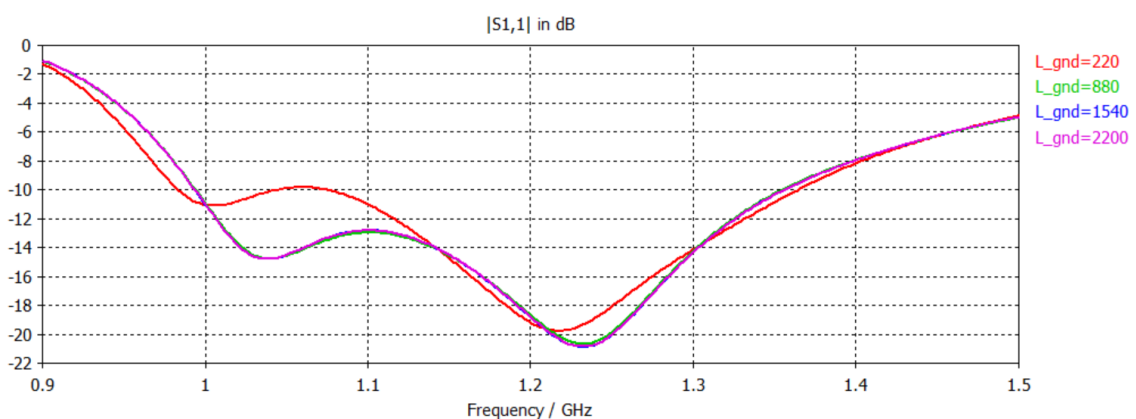
### Variación del plano de masa

Se fijan las dimensiones:  $a=88$  mm,  $b=31$  mm,  $c=18$  mm,  $h=19$  mm,  $w=35$  mm. En la Figura 3.2.11 se puede ver las gráficas de adaptación correspondientes a diferentes valores del lado del plano de masa, uno de los cuales es el valor óptimo (220mm) y los otros dos son menores. Como se puede apreciar en la curva correspondiente al valor óptimo, se cumple que las pérdidas de retorno son aproximadamente de -10 dB en toda la banda de adaptación, mientras que los otros dos casos el nivel de adaptación baja en todo el margen de frecuencias (excepto en la primera resonancia que se intensifica) y por tanto no se cumple el criterio de adaptación en el centro de la banda. Como se esperaba, un plano de masa más pequeño provoca que la adaptación sea peor, una característica muy típica de las antenas de parche.



**Figura 3.2.11. Adaptación de la antena para diferentes valores (pequeños) del lado del plano de masa.**

Es importante analizar el efecto que tiene un plano de masa mayor al óptimo, ya que la presente antena es interesante para ser integrada sobre otras superficies que en muchos casos son metálicas y actúan como plano de masa de dimensiones mucho mayores que el original. En la Figura 3.2.12 se pueden observar varias gráficas de adaptación para diferentes valores del lado del plano de masa; en la curva roja se puede ver la adaptación para el valor del plano de masa óptimo, y en las tres restantes se puede comprobar que una vez se ha aumentado considerablemente el plano de masa la gráfica de adaptación se mantiene constante en todas las frecuencias, con mejor adaptación en el centro de la banda pero con una leve pérdida de ancho de banda.



**Figura 3.2.12. Adaptación de la antena para diferentes valores (grandes) del lado del plano de masa.**

## Conclusiones

Se han analizado los efectos que tienen los parámetros sobre características de la antena. Para ajustar la frecuencia de funcionamiento, se utilizan los parámetros  $a$  y  $h$ ; es interesante que dependa en gran medida de estos dos parámetros porque nos permite un margen de maniobra para controlar la altura de la antena a costa de también modificar la dimensión  $a$ , de forma que es posible ajustarse a restricciones como por ejemplo tener una altura máxima. Para una determinada frecuencia de funcionamiento, si se quiere disminuir  $h$ ,  $a$  debe aumentar y viceversa. El parámetro  $c$  influye notablemente sobre la forma que tiene la curva de adaptación; dependiendo de si se desea tener una única resonancia en el centro de la banda o dos resonancias ligeramente separadas se escoge un valor diferente de  $c$ . Después, se utilizan los parámetros  $w$  y  $b$  para conseguir el máximo nivel de adaptación posible; por lo general, el valor de  $b$  va a ser poco mayor que el parámetro  $c$  porque una menor separación entre placa de alimentación y anillo implica mejor adaptación. El parámetro  $w$  se utiliza para afinar la adaptación al máximo, teniendo en cuenta que tiene cierta relación con el parámetro  $h$ .

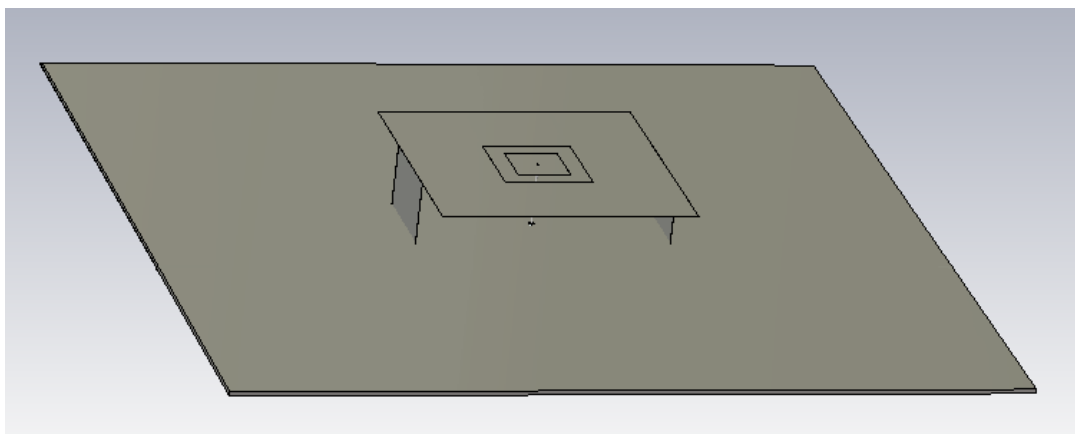
Si se quiere integrar la antena sobre una superficie metálica de dimensiones mucho mayores que el plano de masa sobre el que se ha construido, se ha comprobado que la adaptación no se ve prácticamente afectada; los únicos cambios que se producen son una mejora en el nivel de adaptación (que en cualquier caso es beneficioso) y un ligero descenso del ancho de banda, que en el caso de haber diseñado la antena de forma que cumpla los requisitos de forma muy justa habría que tener en cuenta; en otros casos este descenso no importaría prácticamente porque es mínimo.

### 3.2.3 Prototipo para la banda de radionavegación aérea

En este apartado se va a presentar una antena con la estructura estudiada en este apartado adaptada a los requisitos de la banda de radionavegación aérea comentada en los objetivos del trabajo de fin de grado. De este modo va a cumplir con los requisitos de la ROE que se especifican. También se va a estudiar el diagrama de radiación a lo largo de toda la banda de adaptación, para comprobar si se mantiene estable y su parecido al monopolar ideal.

Las dimensiones de la antena realizada (en relación al esquema de la Figura 3.2.1) son:  $a=87$  mm,  $b=30$  mm,  $c=18$  mm,  $h=21$  mm,  $w=32$  mm. Un modelo 3D de la antena con el plano de masa se puede ver en la Figura 3.2.13.

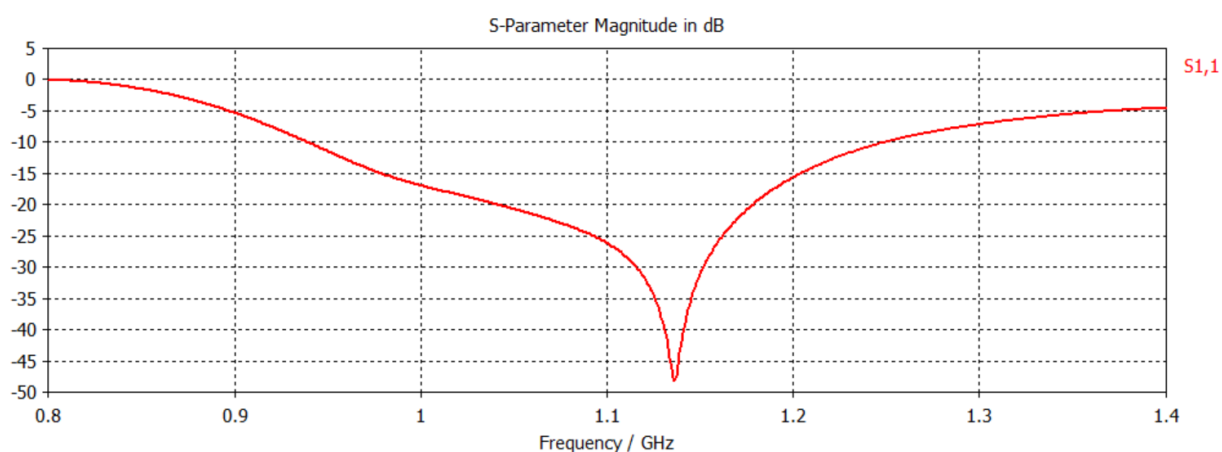




**Figura 3.2.13. Modelo en tres dimensiones de la antena 3.2.3.**

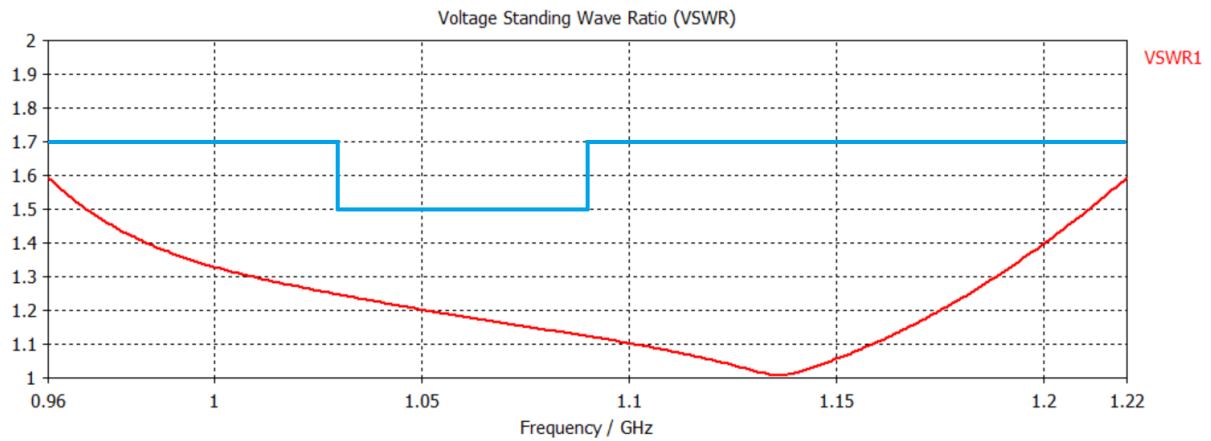
En primer lugar se va a proceder a analizar la gráfica de adaptación, ya que determina en gran medida el ancho de banda de la antena. En éste caso se necesita gran nivel de adaptación en el centro de la banda de operación (en torno a -14dB) y un menor nivel de adaptación en los extremos de la banda de funcionamiento. El parámetro  $|S_{11}|$  (en dB) se puede ver en la Figura 3.2.14; se mantiene bastante constante a lo largo de toda la banda de adaptación, salvo por una resonancia de mayor adaptación (aproximadamente -45 dB) en 1.14 GHz.

De este modo, el ancho de banda a -10dB que es el que se suele tener en cuenta es de 311 MHz a una frecuencia central de 1094 MHz, que equivale al 28.42%. Para esta aplicación también nos interesa el ancho de banda a -14 dB, que es de 240 MHz a una frecuencia central de 1090 MHz, que es el 22%.



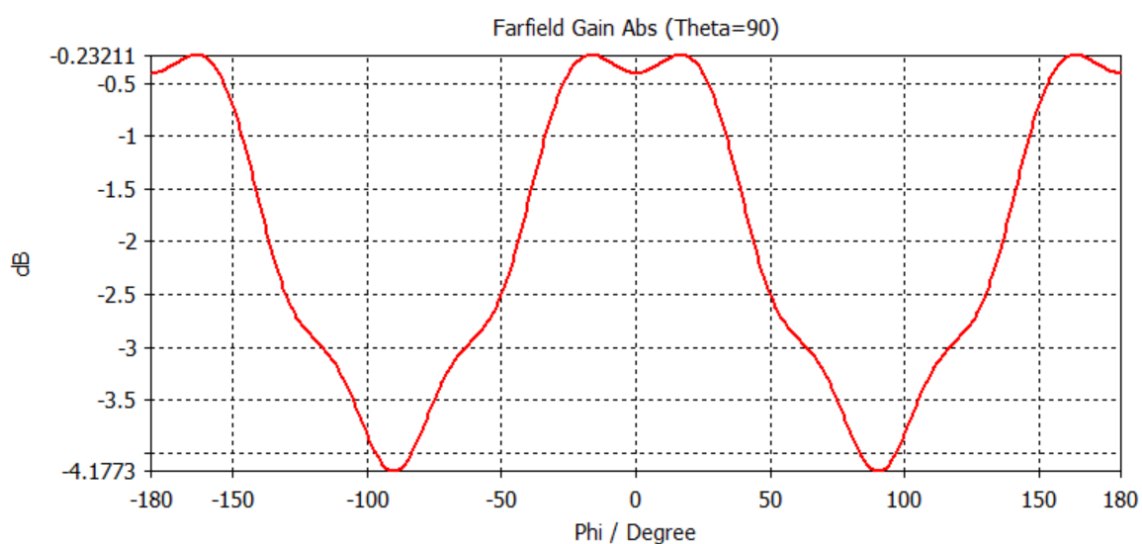
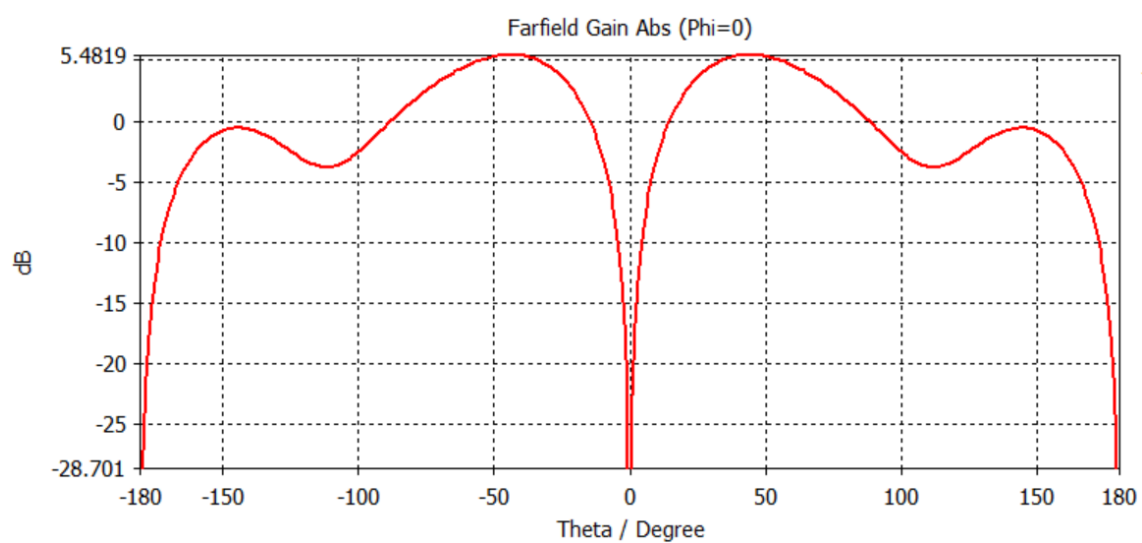
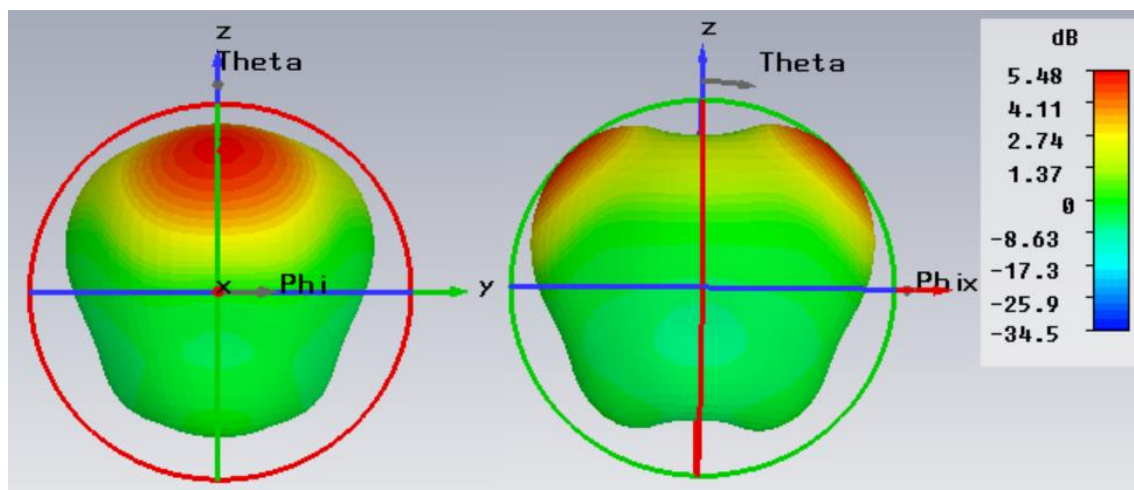
**Figura 3.2.14. Parámetro  $|S_{11}|$  de la antena 3.2.3.**

En la Figura 3.2.15 se puede ver la ROE de la antena en la banda de radionavegación aérea (en rojo) y la ROE mínima requerida para cada frecuencia (en azul). Como se puede comprobar, se cumplen los requisitos de ROE en toda la banda de funcionamiento de forma bastante holgada, ya que tanto en el centro de la banda como en los extremos existe cierto margen con los valores límite.

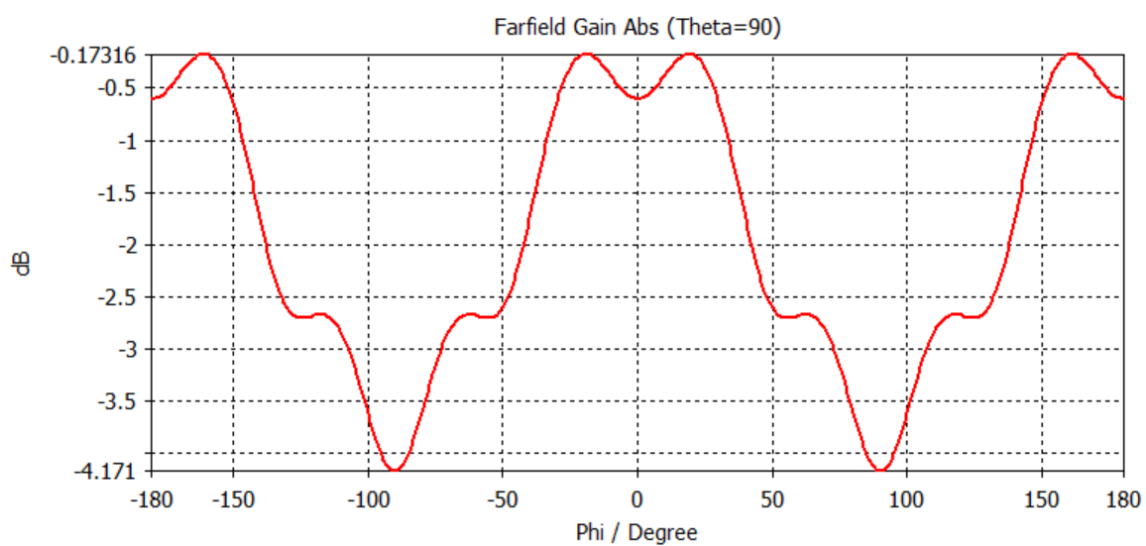
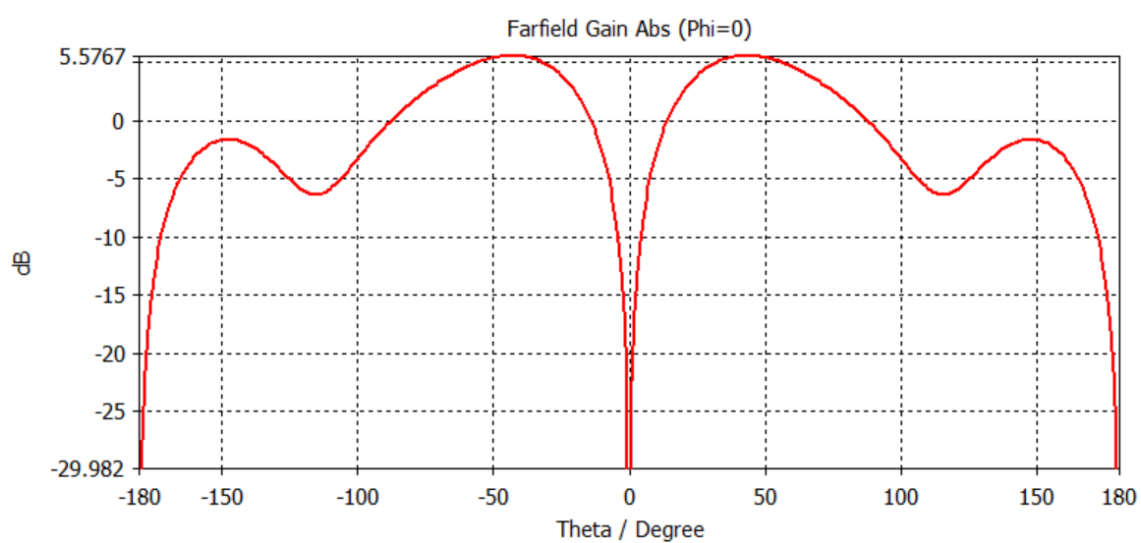
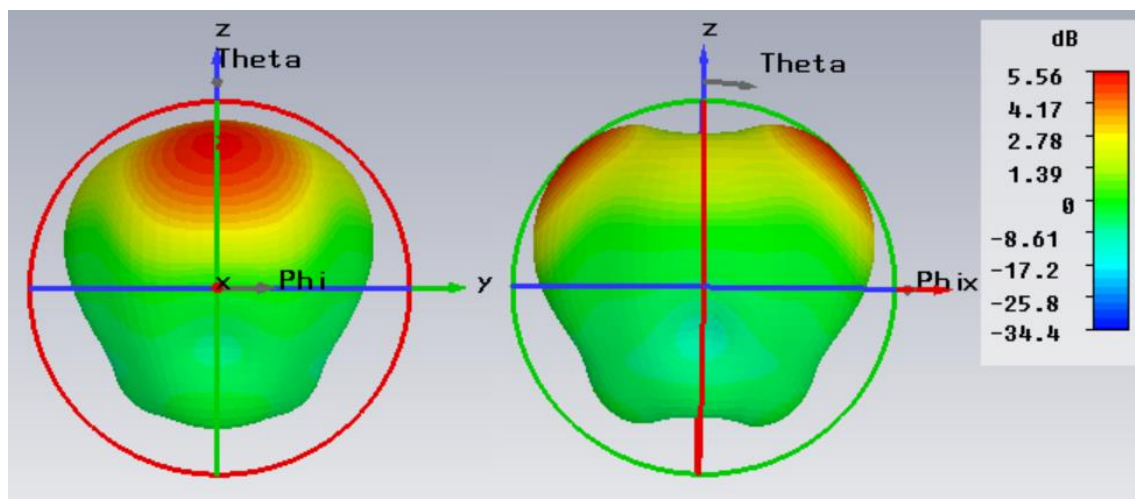


**Figura 3.2.15. ROE de la antena 2.5.3 (en rojo) y ROE máxima en cada frecuencia (en azul).**

Ahora se va a proceder a analizar el diagrama de radiación a lo largo de toda la banda de operación. En las Figuras 3.2.16, 3.2.17, 3.2.18, 3.2.19 y 3.2.20 se pueden observar los diagramas de radiación y cortes con los planos XZ y XY para cinco frecuencias diferentes a lo largo de la banda de funcionamiento; esto es interesante para conocer con detalle el parecido que tiene el diagrama de radiación con el monopolar y para ver si mantiene un diagrama de radiación más o menos estable en toda la banda.



**Figura 3.2.16. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 960 MHz.**



**Figura 3.2.17. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 1025 MHz.**

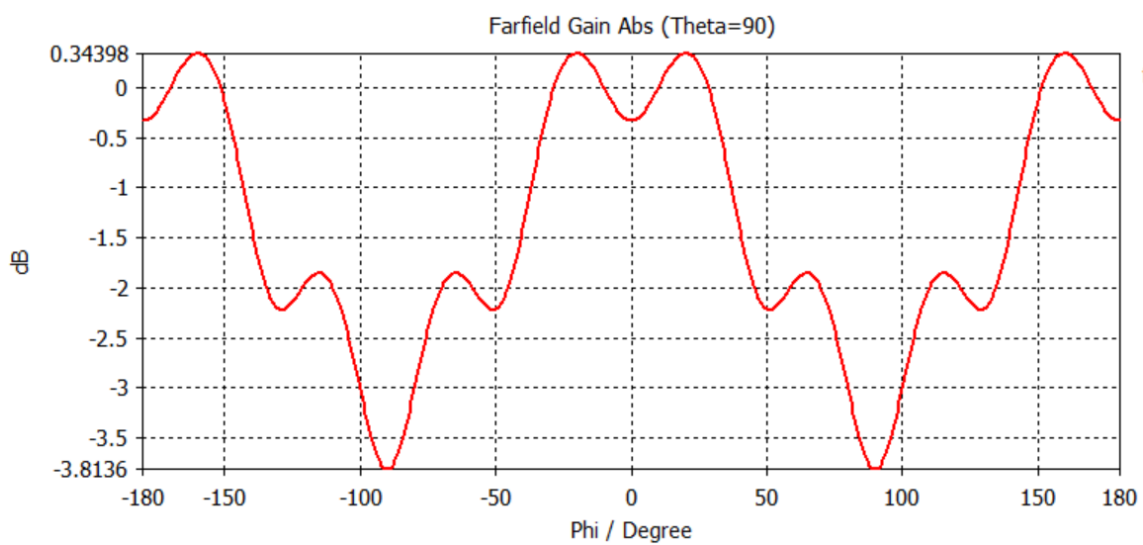
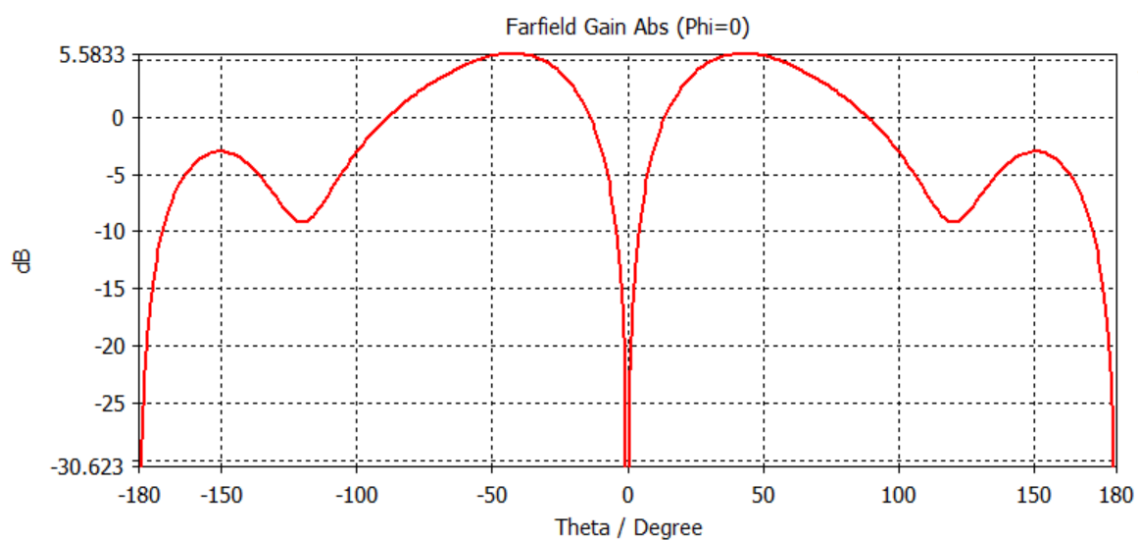
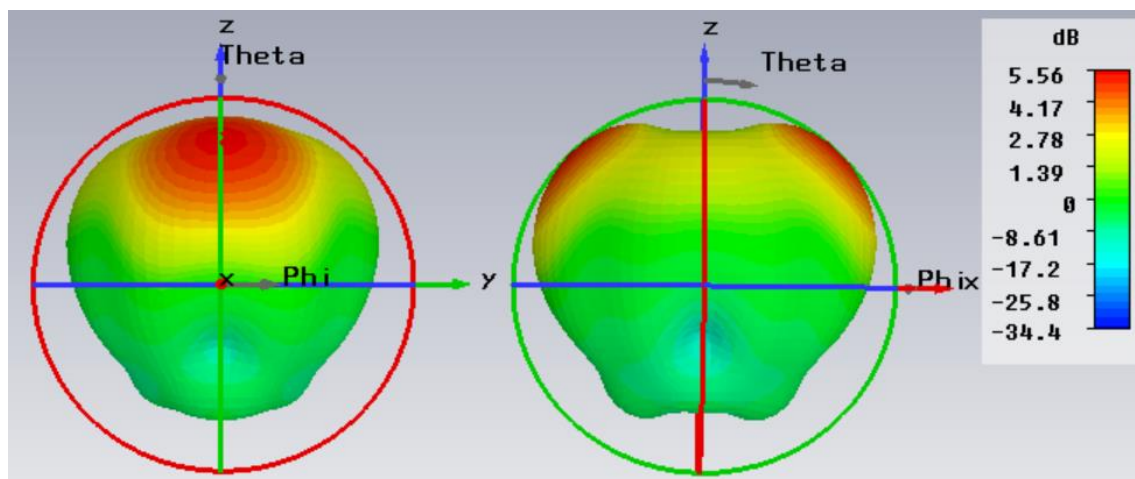
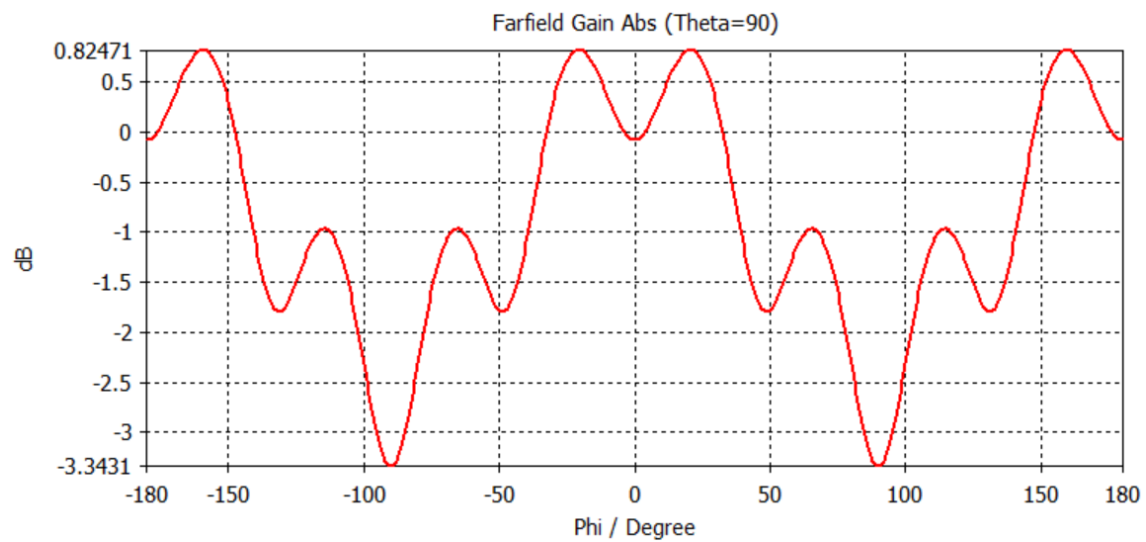
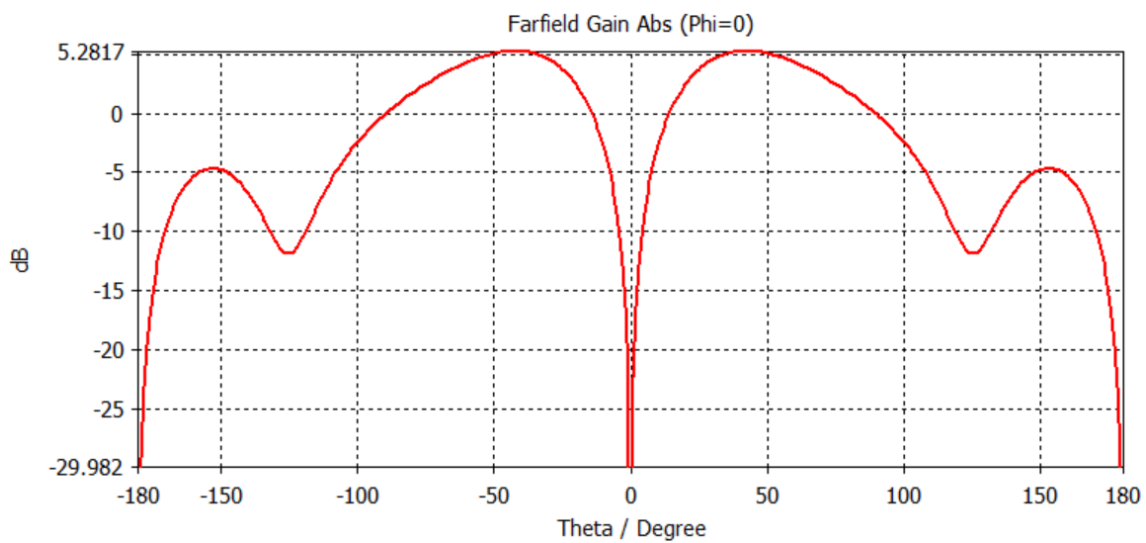
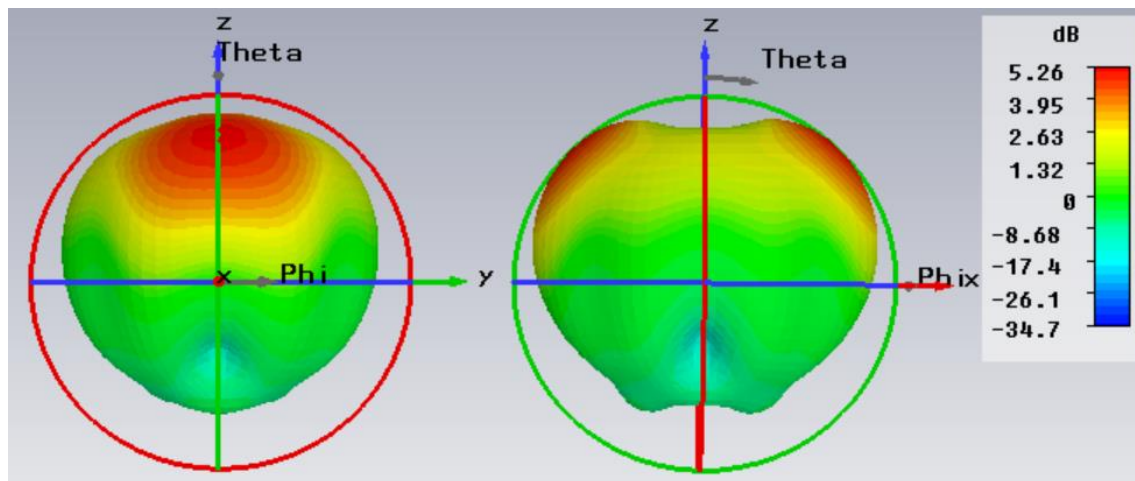
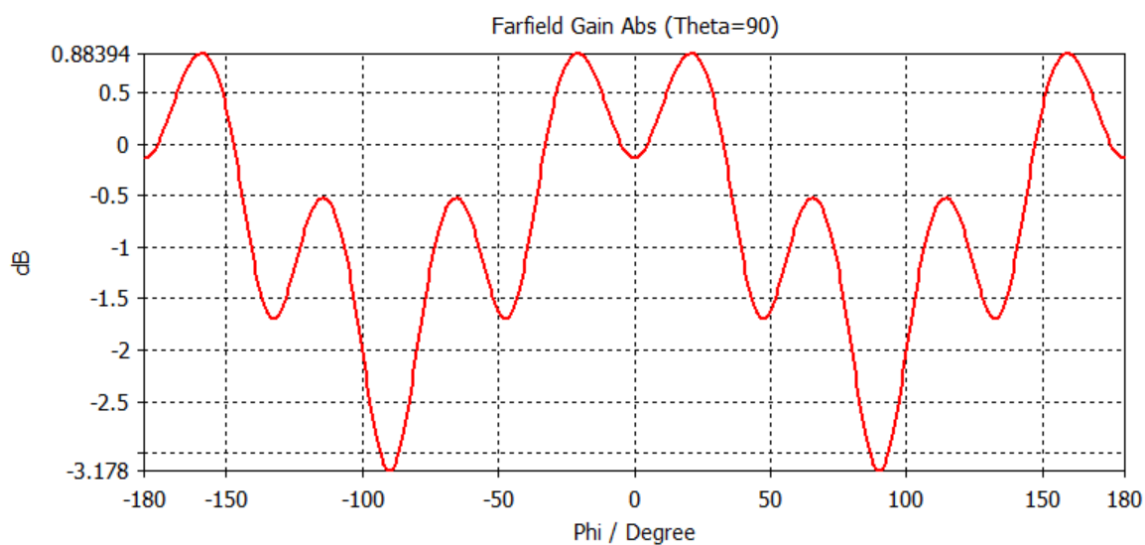
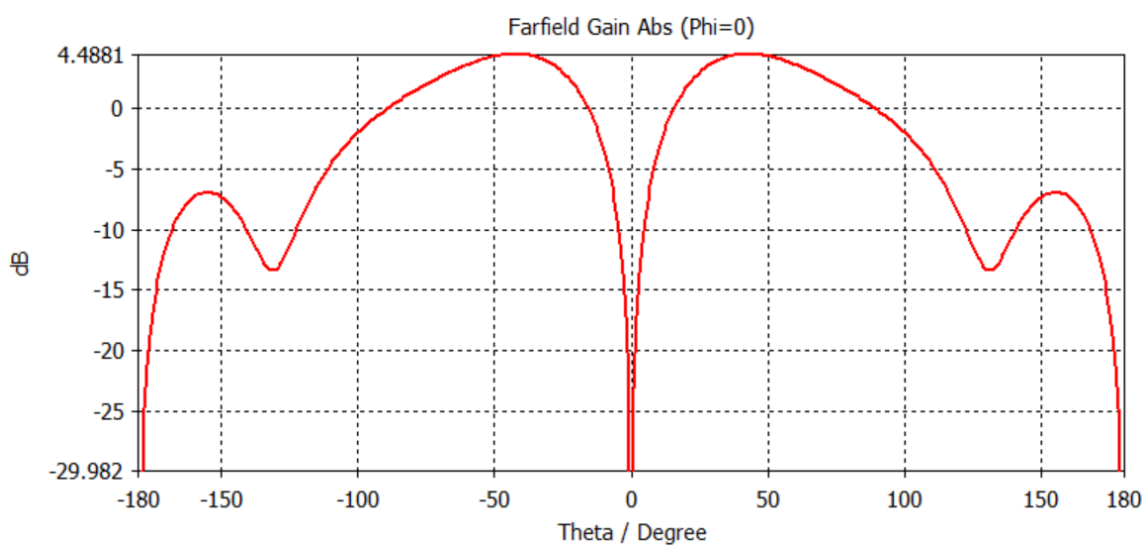
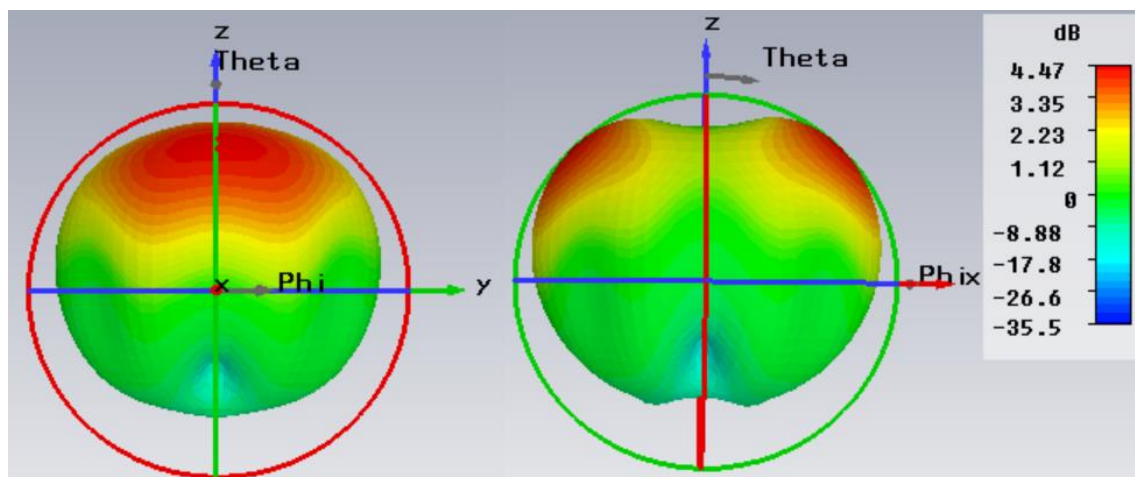


Figura 3.2.18. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 1090 MHz.



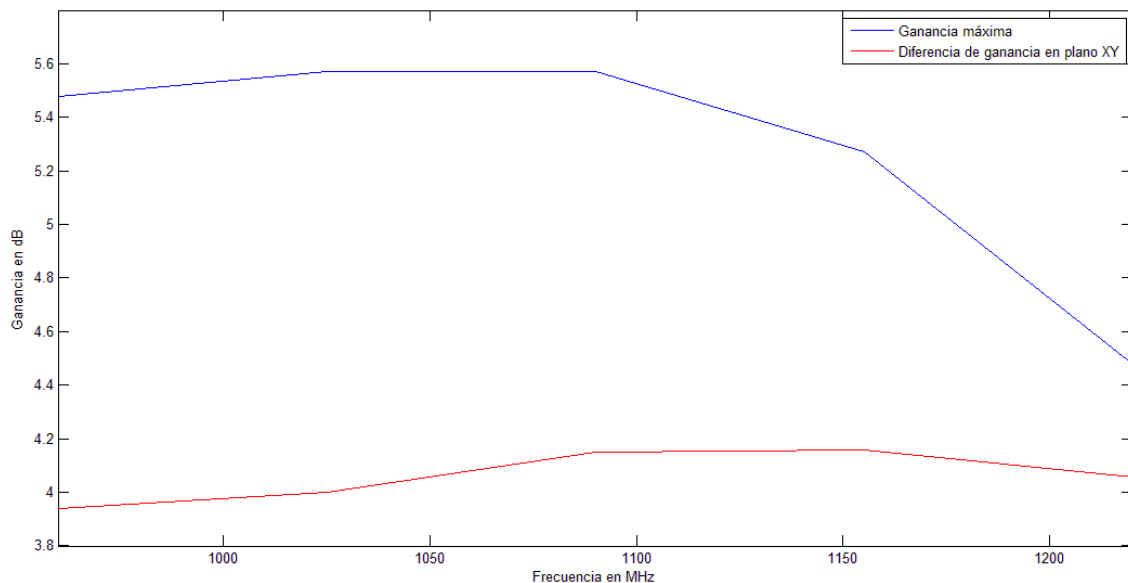
**Figura 3.2.19. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 1155 MHz.**



**Figura 3.2.20. Diagrama de radiación, diagrama de radiación en el plano XZ y diagrama de radiación en el plano XY de la antena 3.2.3 a 1220 MHz.**



Para determinar la similitud con el diagrama de radiación de tipo monopolar, se definen dos valores: el primero es la ganancia máxima, ya que a mayor nivel de ganancia menor similitud con el diagrama de radiación de tipo monopolar porque la distribución de potencia en un diagrama de radiación monopolar es muy uniforme, y esto implica una ganancia baja (aproximadamente 1.76 dB); el segundo es la diferencia entre ganancia máxima y ganancia mínima que existe en el corte con el plano XY porque en un diagrama de radiación monopolar el plano horizontal es omnidireccional. Éstos dos valores se pueden ver en la Figura 3.2.21; la ganancia máxima alcanza su valor más alto en el centro de la banda y disminuye cuando la frecuencia aumenta (pasando de 5.5 dB en el centro de la banda a 4.5 dB en la frecuencia superior), estando los dos picos de ganancia máxima situados en las direcciones donde no hay paredes de cortocircuito; la ganancia máxima es aproximadamente 4 dB superior a la ganancia típica de los diagramas de radiación monopolares, en unidades naturales 2.5 veces. La diferencia de ganancia en el plano XY se mantiene bastante estable en torno a 4 dB. Esto implica que, si se fija  $\theta = 90^\circ$ , se va a radiar aproximadamente 2.5 veces más potencia en  $\phi = 0^\circ$  y  $\phi = 180^\circ$  que en  $\phi = 90^\circ$  y  $\phi = 270^\circ$ .



**Figura 3.2.21. Ganancia máxima y diferencia de ganancia en el plano XY en la banda de funcionamiento.**



## Conclusiones

Se ha demostrado que la antena cumple con los requisitos de la ROE de una forma apropiada, ya que tiene margen respecto a la ROE límite. El diagrama de radiación tiene una clara similitud con el monopolar como se puede ver en los nulos de radiación en  $\theta = 0^\circ$  y  $\theta = 180^\circ$ , pero hay que tener en cuenta que presenta una ganancia máxima más elevada que la típica del diagrama de radiación monopolar (1.76 dB) y el desigual reparto de potencia en  $\phi$  cuando se fija  $\theta$ ; aun teniendo en cuenta estos inconvenientes, se puede utilizar esta antena para radionavegación aérea ya que el diagrama de radiación así lo permite.

## 4. Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se exponen los resultados y conclusiones obtenidos del estudio realizado en este trabajo de fin de grado.

También se van a comentar algunas líneas de investigación sobre las que se podría trabajar utilizando como punto de partida este estudio.

### 4.1 Conclusiones

En el capítulo 1 se ha hecho una introducción a los aspectos más relevantes de las antenas de parche; también se han propuesto los objetivos del trabajo de fin de grado.

En el capítulo 2 se ha realizado el análisis de varias antenas con diagrama de radiación monopolar.

En el apartado 2.1 se ha analizado una antena de parche circular cortocircuitada y con alimentación por coaxial; se ha explicado su estructura y se ha propuesto una antena de ejemplo con resonancias en dos frecuencias de interés, entre ellas la banda de radionavegación aérea. Se ha analizado el parámetro de adaptación  $|S_{11}|$  mostrándose claramente la aparición de dos resonancias de reducido ancho de banda; también se ha analizado el diagrama de radiación a las frecuencias de funcionamiento y el campo eléctrico para relacionar cada resonancia con su modo correspondiente. Después se ha cambiado la alimentación de forma que se realiza alimentación diferencial con dos cables coaxiales obteniéndose que sólo se puede adaptar una resonancia y el ancho de banda se reduce un poco, aunque el diagrama de radiación es prácticamente idéntico al monopolar ideal. En ninguno de los dos casos se consigue el ancho de banda objetivo para cubrir la banda de interés.

En el apartado 2.2 se ha estudiado una antena muy parecida a la del apartado 2.1; en este caso la distancia entre plano de masa y parche ha aumentado y se alimenta por línea acoplada en L. El ancho de banda se ve aumentado en ambas frecuencias de funcionamiento y el diagrama de radiación empeora ligeramente; en el modo TM<sub>01</sub> la ganancia es menos uniforme en el plano XY y en el modo TM<sub>11</sub> la dirección de máxima ganancia se encuentra en  $\theta = 13^\circ$  en lugar de en  $\theta = 0^\circ$ . Al aumentar el perfil de la antena se consigue reducir las dimensiones superficiales del parche para funcionar a la misma frecuencia; esto se puede utilizar si se tienen restricciones sobre la superficie de la antena pero no sobre la altura. No se ha conseguido el ancho de banda objetivo para cubrir la banda de interés.

En el apartado 2.3 se ha seguido trabajando sobre la estructura de la antena del apartado 2.1; en este caso, se ha apilado un parche circular sobre la original. De este modo, lo que se pretende es crear más resonancias. Se ha analizado la influencia de los

parámetros dimensionales sobre las frecuencias de resonancia, estudiando sus efectos de forma independiente sobre las frecuencias de resonancia asociadas al modo TM01 y al modo TM11. Se ha concluido que se obtienen cuatro frecuencias de resonancia, dos asociadas al modo TM01 y dos asociadas al modo TM11. Las dos frecuencias asociadas al modo TM01 tienen una relación prácticamente fija de 1.25 aproximadamente, lo que impide juntar ambas resonancias para crear una sola frecuencia de resonancia de banda ancha. Las dos frecuencias asociadas al modo TM11 mantienen una relación ajustable que va desde 1.15 a 1; de este modo permite juntar las dos resonancias para conseguir una resonancia de banda ancha.

Se han propuesto dos ejemplos de antena utilizando lo explicado anteriormente. El primer prototipo tiene tres frecuencias de funcionamiento, dos monopulares asociadas al modo TM01 de reducido ancho de banda y una frecuencia con diagrama de radiación de tipo broadside asociada al modo TM11 con ancho de banda elevado. El segundo prototipo tiene 4 frecuencias de funcionamiento, dos monopulares asociadas al modo TM01 y dos broadside asociadas al modo TM11; en cada modo, el ancho de banda es aproximadamente del 5% en la resonancia de la frecuencia inferior y del 1% en la resonancia de la frecuencia superior. En ambos prototipos los diagramas de radiación se ven ligeramente deteriorados en comparación al ideal. No se consigue el ancho de banda objetivo para cubrir la banda de interés.

En el capítulo 3 se han analizado dos antenas de parche con diagrama de radiación monopolar y banda ancha.

En el apartado 3.1 se ha estudiado un parche cuadrado con paredes de cortocircuito en dos de sus lados y alimentado con un disco por acoplo magnético. Se ha presentado su geometría y se ha explicado brevemente su funcionamiento, así como el campo eléctrico en el interior del parche y el diagrama de radiación que crea. Después, se han analizado los parámetros dimensionales y su influencia sobre la adaptación (parámetro  $|S_{11}|$ ), concluyéndose que hay tres aspectos sobre los que pueden influir los parámetros analizados: frecuencia de funcionamiento, número de resonancias que tiene la curva de adaptación y nivel de adaptación. Se ha relacionado cada parámetro analizado con uno o más aspectos de los mencionados. Se ha analizado por separado la influencia que tiene la dimensión del plano de masa sobre el ancho de banda de la antena ya que este tipo de antena puede ser integrada sobre superficies metálicas de dimensiones elevadas.

Se ha diseñado un prototipo de esta antena que cumple los requisitos de la banda de radionavegación aérea objetivo, ya que cumple los requisitos de adaptación en toda la banda y tiene un diagrama de radiación de tipo monopolar a lo largo de toda la banda de funcionamiento; la ganancia máxima no presenta valores muy altos, y presenta una radiación bastante uniforme en el plano XY que hace que esta antena sea idónea para radionavegación aérea.

Además, se ha diseñado un prototipo adicional para cubrir la banda de radionavegación aérea que se encuentra en proceso de fabricación. Se adjuntan los planos de la antena en el Anexo I.

En el apartado 3.2 se ha analizado una antena que consiste en un anillo cuadrado con paredes de cortocircuito en dos de sus lados y que está alimentado por una placa metálica situada en su centro. Se ha explicado su geometría y se ha explicado brevemente su funcionamiento, concretamente el diagrama de radiación que provoca el campo eléctrico que se crea en su interior. Se han analizado los efectos de los parámetros dimensionales y su influencia sobre la adaptación (parámetro  $|S_{11}|$ ), relacionando cada parámetro con uno o más aspectos sobre los que influyen: frecuencia de funcionamiento, número de resonancias que tiene la curva de adaptación y nivel de adaptación. Se ha estudiado la influencia del plano de masa sobre el ancho de banda de la antena, ya que es previsible la integración de la antena sobre superficies metálicas de dimensiones elevadas.

Se ha diseñado un prototipo de la antena que cumple los requisitos de la banda de radionavegación aérea anteriormente mencionada, ya que cumple los requisitos de adaptación en toda la banda de forma muy holgada y tiene un diagrama de radiación con suficiente parecido al monopolar puro como para poder ser utilizada en radionavegación aérea.

## 4.2 Líneas futuras de investigación

Este trabajo de fin de grado puede servir de punto de partida para varias líneas de investigación.

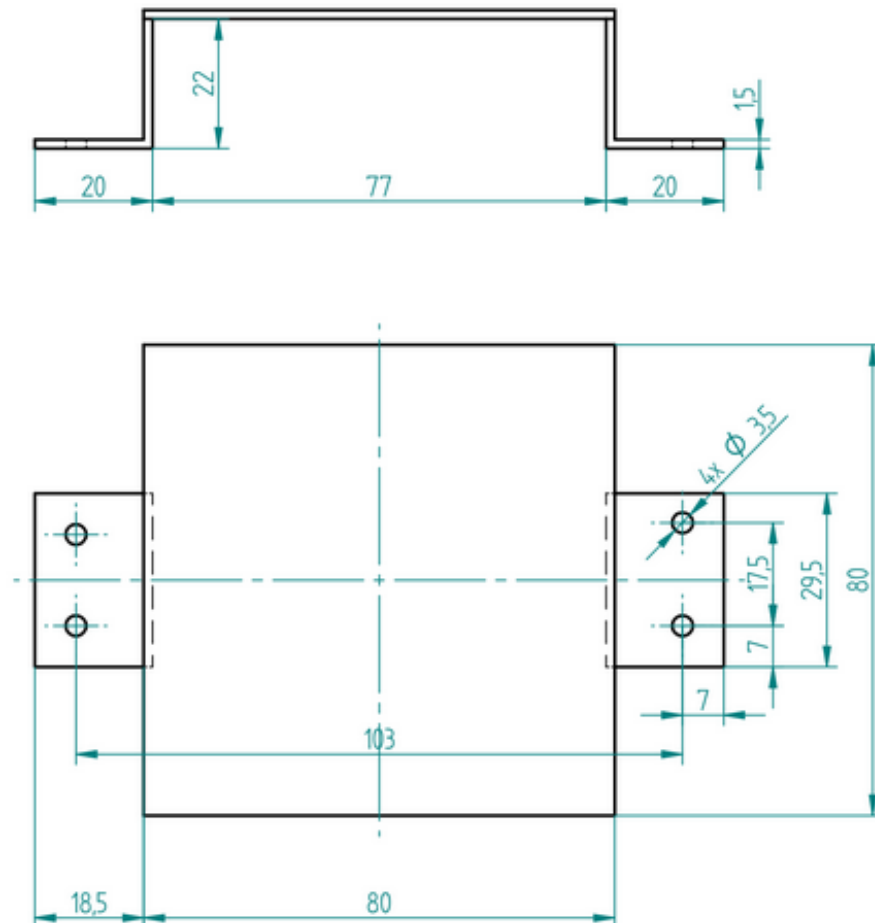
### **4.2.1 Polarización circular**

En los apartados 3.1 y 3.2 se han conseguido antenas de parche con diagrama de radiación de tipo monopolar y ancho de banda elevado con polarización lineal. En algunos sistemas de comunicaciones se requieren antenas con polarización circular para facilitar la orientación de las antenas. Sería interesante estudiar formas de alimentación diferentes que permitiesen polarización circular, como por ejemplo incluir dos puertos en lugar de uno, estando uno de ellos desfasado 90°; esto complicaría el diseño y construcción de la antena, pero es un aspecto interesante que podría ser desarrollado.

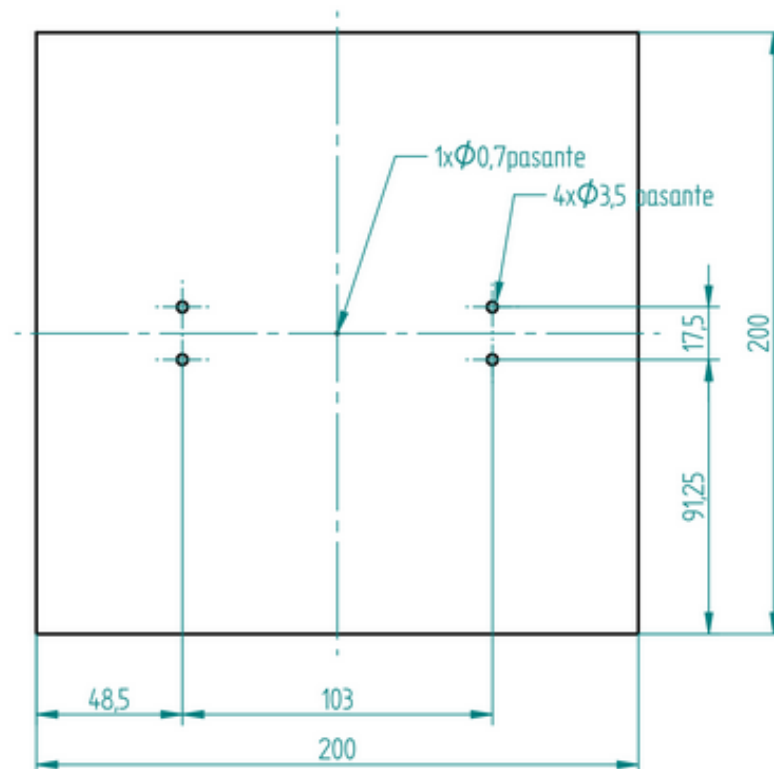
#### **4.2.2 Incremento del ancho de banda**

En las antenas estudiadas en 2.1, 2.2 y 2.3 el ancho de banda en las frecuencias que presentan diagrama de radiación monopolar no suele ser muy alto, ya que el máximo que se consigue es del 5%, que para los actuales sistemas de comunicaciones se puede quedar corto, como por ejemplo para los objetivos de este trabajo. Sería interesante estudiar diferentes tipos de alimentaciones, como por ejemplo la alimentación por línea microstrip acoplada por apertura. El diseño y la fabricación se complican bastante pero puede ser interesante si se consigue un aumento considerable del ancho de banda. En cualquier caso, no hay que olvidar que las antenas de parche son antenas resonantes y llevan asociado un ancho de banda reducido.

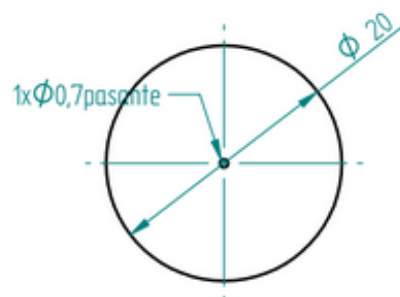
## Anexo I. Planos del prototipo de antena para radionavegación aérea



	Nombre	Fecha	 OFICINA TÉCNICA UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID		
Dibujado	E.A.P.	05/06/14			
Comprobado					
Material	Chapa acero inox. 1,5 mm			Título: OT-2014-2307-Antena placa	
Acabado					
Cantidad			A4	Plano: 001-Tapa superior	Rev
Tolerancias no especificadas según ISO 2768-m.			Archivo: PlanosEsther.dft		
			Escala 1:1		Hoja 2 de 1



	Nombre	Fecha	 <b>OFICINA TÉCNICA</b> <b>UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID</b>		
Dibujado	EAP.	05/06/14			
Comprobado					
Material	Chapa acero inox. 15 mm			Título: OT-2014-2307-Antena placa	
Acabado					
Cantidad			A4	Plano: 002-Placa base	Rev
Tolerancias no especificadas según ISO 2768-m.			Archivo: PlanosEsther.dft		
			Escala 1:1		Hoja 2 de 1



	Nombre	Fecha		OFICINA TÉCNICA UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID	
Dibujado	E.A.P.	05/06/14		Título: OT-2014-2307-Antena placa	
Comprobado					
Material	Chapa acero inox. 1,5 mm				
Acabado					
Cantidad			A4	Plano: 003-Disco	Rev
Tolerancias no especificadas según ISO 2768-m.			Archivo: PlanosEsther.dft		
			Escala 1:1		Hoja 2 de 1



# Anexo II. Presupuesto

**1. Autor:** Pablo Vera Sesmero

**2. Departamento:** Teoría de la Señal y Comunicaciones

## **3. Descripción del proyecto:**

-Título: Antenas de parche con diagrama de radiación monopolar y banda ancha.

-Duración (meses): 5.

-Tasa de costes indirectos: 20%.

**4. Presupuesto total del proyecto (en euros):** 13442.16 euros.

## **5. Desglose presupuesto (costes directos):**

### PERSONAL

Apellidos y nombre	NIF	Categoría	Dedicación (hombres mes) <sup>a)</sup>	Coste hombres mes	Coste (Euros)	Firma de conformidad
Vera Sesmero, Pablo	-	Ingeniero Junior	2.2857	2694.39	6158.56	
Herraiz Martínez, Francisco Javier	-	Ingeniero Senior	0.2285	4289.54	980.15	
Técnico de laboratorio	-	Técnico	0.076	2694.39	204.77	
Hombres mes			2.5902	Total	7343.48	

<sup>a)</sup> 1 hombre mes = 131.25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)

Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8.8 hombres mes (1155 horas)

### EQUIPOS

Descripción	Coste (euros)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable
Ordenador	700	100	5	60	58.33
Software de simulación	30000	100	5	60	2500
Analizador de redes	150000	100	0.1	60	250
Cámara anecoica	200000	100	0.1	60	333.33
Máquinas para fabricación de prototipo	50000	100	0.2	60	166.66
Total					3308.32

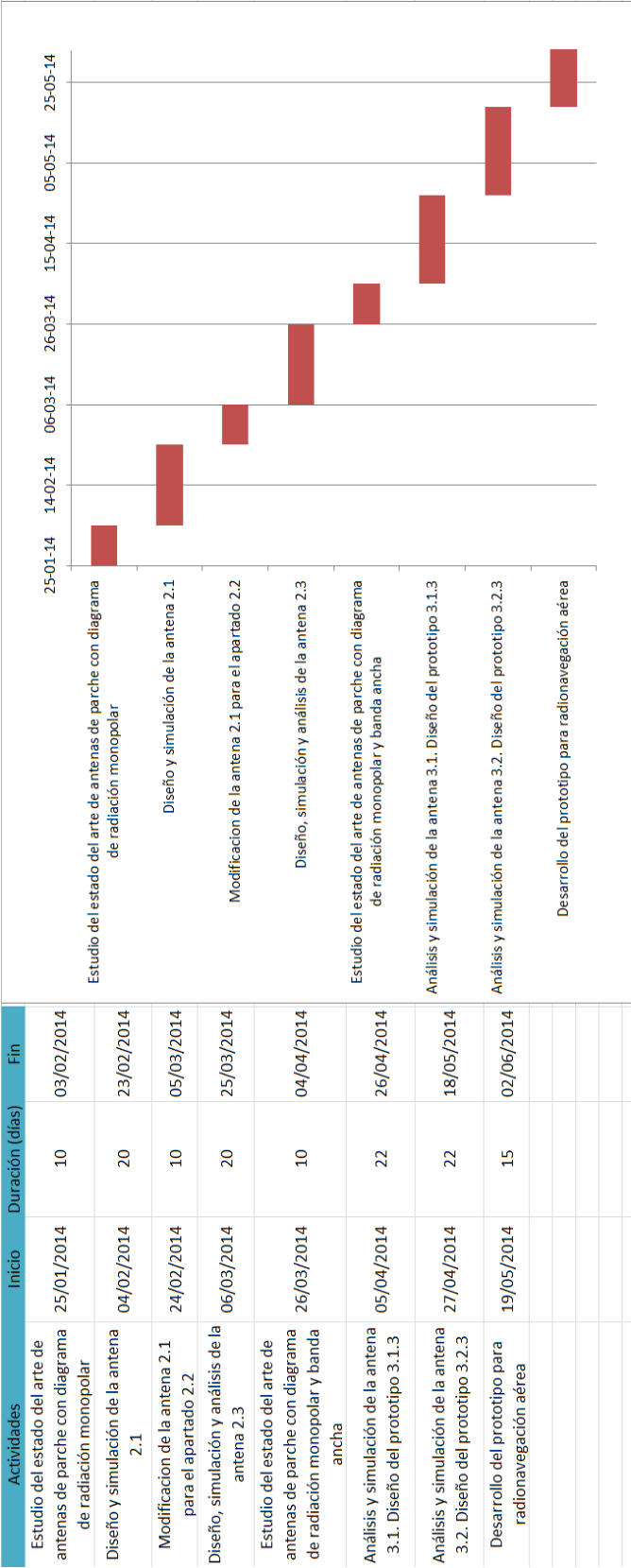
## OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO

Descripción	Empresa	Costes imputables
Costes de materiales para fabricación de prototipos	UC3M	150
Ingeniero para medir antenas	UC3M	400
Total		550

## **6. Resumen de costes**

Descripción	Presupuesto costes totales
Personal	7343.48
Amortización	3308.32
Costes de funcionamiento	550
Costes indirectos	2240.36
Total	13442.16

# Anexo III. Planificación



# Anexo IV. Características de productos comerciales

## Comant CI 101 (antena para DME)



### Specifications

#### Electrical

Frequency	1030 to 1090 MHz
VSWR	1.5:1 1030 MHz / Return Loss 14.0 dB 1.5:1 1090 MHz / Return Loss 14.0 dB
Polarization	Vertical
Radiation Pattern	Equivalent of 1/4 wave stub typical
Impedance RF	50 Ohms
Resistance DC	Open Circuit
Power RF	1.0 KW Peak

#### Mechanical

Weight	0.06 lb. Maximum
Height	3.33 in. Maximum
Finish	Tin-nickel Alloy
Connector	BNC (Female)

#### Environmental

Temperature	-54C to +55C
Altitude	30,000 ft

#### Federal Specifications

RTCA Env. / MOPS	DO-138
FAA TSO	C74c

### Comant CI 105-3 (antena para DME)



#### Specifications

##### Electrical

Frequency	960-1220 MHz
VSWR	1.5:1 Max 960-1220 MHz 1.3:1 Max 1025-1150 MHz
Polarization	Vertical
Radiation Pattern	Equivalent to a 1/4 wave stub
Impedance RF	50 Ohms
Resistance DC	Open Circuit
Power RF	2.5 KW Peak

##### Mechanical

Weight	0.24 lbs
Height	3.31 inches
Finish	Polyurethane Enamel
Connector	BNC (female)

##### Environmental

Temperature	-54 C to +55 C
Altitude	70,000 ft.

##### Federal Specifications

FAA TSO	C66b, C74c
RTCA Environmental	DO-160C
Gasket	B10505

### FA-10369 (antena para TACAN)

Performance Characteristics:

Type: Mechanically scanned (rotating)

Frequency Range: 1X through 126X; 1Y through 126Y 960 through 1215 MHz (no adjustments or tuning required)

Input Power Requirement: + 28 Vdc ? 6 Vdc - 300 Watts (running)

Time to come up to speed: Approximately 80 seconds

Rotation Speed: 900 rpm  $\pm$  0.015%

VSWR: 962 MHz to 1213 MHz < 1.8 to 1

Harmonic Content:

- 1.) RSS of 30 & 45 Hz:  $< \text{ or } = 20\%$  of 15 Hz
- 2.) RSS of 270 & 405 Hz:  $< \text{ or } = 15\%$  of 135 Hz
- 3.) RSS of 105, 120, 150, 165 Hz:  $< \text{ or } = 25\%$  of 15 Hz
- 4.) All Individual Harmonics:  $< \text{ or } = 20\%$  of 15 Hz

Vertical Coverage: Main Lobe Peak Between  $2^\circ$  and  $7^\circ$  above horizon. Approx CSC2 Coverage to  $+60^\circ$ .

Slope:  $> \text{ or } = 0.2 \text{ V/V/}^\circ$  (Normalized to Value at Horizon)

15 Hz % Modulation:  $21\% \pm 9\%$

135 Hz % Modulation:  $21\% + 14\% - 9\%$

Energy Below Horizon:  $< 5\%$  of total energy radiated

Peak Gain:  $> 8.0 \text{ dBi}$

Horizon Gain:  $> 2.0 \text{ dBi}$

135 Hz Cross-Polarization Error in Vicinity of Horizon:  $\pm 1.0^\circ$  RMS maximum

15 Hz Cross-Polarization Error in Vicinity of Horizon:  $\pm 3.0^\circ$  RMS maximum

Carrier Circular Pattern: Circular within  $\pm 0.5 \text{ dB}$

135 Hz Azimuth Error:  $\pm 0.5^\circ$  RMS maximum

15 Hz Azimuth Error:  $\pm 3.5^\circ$  RMS maximum

Orientation (magnetic): Electronically Settable

Size and Weight: Antenna - 118" Tall x 35" Dia x 310 lbs ACU - 12.25" T x 19" W x 16.5" D x 30 lbs

Environment: FAA-G-2100 Environment III

# Bibliografía

- [1] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory. Analysis and Design*, ed. John Wiley and Sons, 1982.
- [2] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl and Apisak Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*, ed. Artech House, 2001.
- [3] Ogocu, G.; Alatan, L.; Civi, O.A., "Effect of the finite grounded substrate on the input impedance of the microstrip patch antenna," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*, vol.2B, no., pp.404,407 vol. 2B, 3-8 July 2005.
- [4] Rathi, V.; Rawat, S.; Pokhariya, H.S., "Study the effect of substrate thickness and permittivity on patch antenna," *Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2011 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1,4, 14-16 Sept. 2011.
- [5] Banik, S.; Biswas, M., "The effect of composite and suspended substrate on resonant resistance of circular microstrip patch antenna," *Communications, Devices and Intelligent Systems (CODIS), 2012 International Conference on* , vol., no., pp.231,234, 28-29 Dec. 2012.
- [6] Colburn, J.S.; Rahmat-Samii, Y., "External substrate perforation applied to patch antennas for mitigating surface wave effects," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1999. IEEE* , vol.3, no., pp.1928,1931 vol.3, 11-16 July 1999.
- [7] Islam, M.T.; Shakib, M.N.; Misran, N., "Design of meandering probe fed microstrip patch antenna for wireless communication system," *Computers and Information Technology, 2009. ICCIT '09. 12th International Conference on* , vol., no., pp.537,540, 21-23 Dec. 2009.
- [8] Ooi, B.L.; Ang, I., "Broadband semicircle-fed flower-shaped microstrip patch antenna," *Electronics Letters* , vol.41, no.17, pp.939,940, 18 Aug. 2005.
- [9] Rahayu, Y.; Rahman, T.A.; Ngah, R.; Hall, P.S., "Slotted ultra wideband antenna for bandwidth enhancement," *Antennas and Propagation Conference, 2008. LAPC 2008. Loughborough* , vol., no., pp.449,452, 17-18 March 2008.
- [10] Jamshidifar, M.; Arazm, F.; Ghobadi, C.; Nourinia, J., "Miniaturized, wideband fractal patch antenna," *Wireless Communications and Applied Computational*

*Electromagnetics*, 2005. *IEEE/ACES International Conference on* , vol., no., pp.946,951, 3-7 April 2005.

- [11] Guanlong Huang; Shu Lin; Xueying Zhang; Runnan Cai; Wenbin Zhang; Caitian Yang; Jinxiang Wang, "Bilayer miniature broadband microstrip patch antenna with Minkowski fractal," *Microwave Conference Proceedings (CJMW), 2011 China-Japan Joint* , vol., no., pp.1,4, 20-22 April 2011
- [12] Islam, M.T.; Misran, N.; Shakib, M.N.; Yatim, B., "Wideband Stacked Microstrip Patch Antenna for Wireless Communication," *Parallel and Distributed Processing with Applications, 2008. ISPA '08. International Symposium on* , vol., no., pp.547,550, 10-12 Dec. 2008.
- [13] Shi-Ju Wei; Ying-Zeng Yin; You-Huo Huang; Shou-tao Fan; Le Kang; Li, X., "Novel smiling face-shaped antenna for dual band-notched ultra-wideband applications," *Ultra-Wideband (ICUWB), 2010 IEEE International Conference on* , vol.2, no., pp.1,3, 20-23 Sept. 2010.
- [14] Yong-Xin Guo; Chia, M. Y W; Zhi Ning Chen; Kwai-Man Luk, "Wide-band L-probe fed circular patch antenna for conical-pattern radiation," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.52, no.4, pp.1115,1116, April 2004.
- [15] Gonzalez-Posadas, V.; Segovia-Vargas, D.; Rajo-Iglesias, E.; Vazquez-Roy, J.L.; Martin-Pascual, C., "Approximate analysis of short circuited ring patch antenna working at  $TM_{01}$  mode," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.54, no.6, pp.1875,1879, June 2006.
- [16] Chuang-Jia Shih; Shun-Lai Ma; Jeen-Sheen Row. "Dual-Band Circular Microstrip Antennas with Conical Beam Radiation," *NST 2011*, 18-19 November 2011.
- [17] Sekra, P.; Sharma, V.; Bharadwaj, D.; Bhatnagar, D.; Saxena, V.K.; Saini, J.S., "Multi frequency circular patch antenna with slit for modern communication systems," *Recent Advances in Microwave Theory and Applications, 2008. MICROWAVE 2008. International Conference on* , vol., no., pp.898,900, 21-24 Nov. 2008.
- [18] Sarkar, I.; Sarkar, P.P.; Chowdhury, S.K., "A novel compact, microstrip antenna with multifrequency operation," *Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, 2009. DIPED 2009. International Seminar/Workshop on* , vol., no., pp.147,151, 21-24 Sept. 2009.
- [19] Samsuzzaman, M.; Misran, N.; Mandeep, J.S.; Islam, M.T., "An inverted S-shaped multi-frequency patch antenna for X band applications," *Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2013 International Conference on* , vol., no., pp.1,4, 17-18 May 2013.



- [20] Yong-Xin Guo; Chia, M. Y W; Zhi Ning Chen; Kwai-Man Luk, "Wide-band L-probe fed circular patch antenna for conical-pattern radiation," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.52, no.4, pp.1115,1116, April 2004.
- [21] Juhua Liu; Quan Xue; Hang Wong; Hau Wah Lai; Yunliang Long, "Design and Analysis of a Low-Profile and Broadband Microstrip Monopolar Patch Antenna," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.61, no.1, pp.11,18, Jan. 2013.
- [22] Juhua Liu; Shaoyong Zheng; Yuanxin Li; Yunliang Long, "Broadband Monopolar Microstrip Patch Antenna With Shorting Vias and Coupled Ring," *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE* , vol.13, no., pp.39,42, 2014.
- [23] Jeen-Sheen Row; Shing-Hau Chen, "Wideband monopolar square-ring patch antenna," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.54, no.4, pp.1335,1339, April 2006.
- [24] Siou-Jhen Lin; Jeen-Sheen Row, "Monopolar Patch Antenna With Dual-Band and Wideband Operations," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.56, no.3, pp.900,903, March 2008.
- [25] Row, J.-S.; Wu, S-W, "Monopolar square patch antennas with wideband operation," *Electronics Letters* , vol.42, no.3, pp.139,140, 2 Feb. 2006.
- [26] Lau, K.L.; Luk, K.M., "A wide-band monopolar wire-patch antenna for indoor base station applications," *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE* , vol.4, no., pp.155,157, 2005.